

3100097008842

**STUDI ANALISIS
PEMILIHAN MATRIKS PEMBOBOT
PADA UMPAN BALIK OPTIMAL LQR
DI PLTU GRESIK**

TUGAS AKHIR

Disusun oleh :

I GEDE PUTU AMBARA GUNA

NRP. 290 220 1533

RSE

620 831 4

Gun

S-1

1996



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
1996**

PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	15 JAN 1997
Terima Dari	H

**STUDI ANALISIS
PEMILIHAN MATRIKS PEMBOBOT
PADA UMPAN BALIK OPTIMAL LQR
DI PLTU GRESIK**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
S u r a b a y a**

Mengetahui / Menyetujui

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



(Ir. H.M. DJOKO SANTOSO)



(Ir. IMAM ROBANDI, M.T.)

**S U R A B A Y A
JULI, 1996**

ABSTRAK

Matriks pembobot dipilih untuk menentukan sifat kinerja desain kontrol pada umpan balik optimal LQR (Linear Quadratic Regulator), tetapi pada umumnya matriks pembobot ini nilainya diasumsikan atau ditentukan.

Untuk itu diperlukan suatu studi dalam menentukan besarnya matriks pembobot dan pengaruhnya pada sistem umpan balik optimal yaitu dengan metode Trial and Error, Bryson, dan Eksak. Dari simulasi metode-metode tersebut dapat diketahui sifat kinerja desain kontrol yang paling sesuai dan menghasilkan indeks kerja optimal dengan melihat parameter masukan dan keluaran di PLTU Gresik yang merupakan penyuplai listrik pada sistem interkoneksi Jawa-Bali.

Dengan melihat hasil simulasi diperoleh bahwa nilai matriks pembobot mempengaruhi indeks kinerja sistem. Dengan metode Trial and Error respon yang diperoleh belum memuaskan, dengan metode Bryson diperoleh respon yang memuaskan namun belum tentu sesuai dengan karakteristik yang diinginkan dan dengan metode eksak dapat memberikan respon yang memuaskan sesuai dengan karakteristik akar-akar sistem yang diinginkan tetapi nilai respon umpan baliknya tidak optimal.

KATA PENGANTAR

Puji syukur Penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan berkah dan rahmat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul *Studi Analisis Pemilihan Matriks Pembobot Pada Umpan Balik Optimal LQR Di PLTU Gresik*.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro pada Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penulis dalam menyusun Tugas Akhir ini telah berusaha dengan segenap kemampuan dengan harapan menghasilkan karya sebaik mungkin, namun hasil penulisan ini masih terasa jauh dari sempurna. Meskipun demikian besar harapan Penulis semoga buku Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dalam menambah ilmu bagi para pembaca.

Surabaya, Juni 1996

Penulis

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan selesainya Tugas Akhir ini, perkenankanlah Penulis mengucapkan rasa syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa hanya karena rahmatNya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini, dan terima kasih yang tulus ucapkan kepada :

1. Ir. H.M Djoko Santoso, selaku Dosen Pembimbing I yang telah meluangkan waktu untuk memberikan dorongan dan persetujuan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
2. Ir. Imam Robandi M.T., sebagai Dosen Pembimbing II yang telah memberikan dorongan, bimbingan dan pengarahan pada penyusunan Tugas Akhir ini.
3. Dr. Ir. Moch. Salehuddin, M.Eng.Sc, sebagai Ketua Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS.
4. Dr. Ir. Soebagio, sebagai Dosen Wali yang telah banyak membantu penulis selama masa perkuliahan.
5. Ir. Rusdi, M.T., di Lab. SPP dengan segala bantuannya.
6. Rekan-Rekan seperjuangan Bayu, Iwa, Darmo, Wawan, Saptono, Yudi, Wawan, Mustika, Rochim, Syahrul semoga kompak selalu.
7. Rekan-Rekan di Lab. PKDST yang mendengarkan keluhanku dan memberi bantuan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
8. Rekan SS-31 Crew Moll-En, Kompyang, Manpit, Putu, dan Mada atas segala bantuannya.

DAFTAR ISI

JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iii
KATA PENGANTAR	iv
UCAPAN TERIMA KASIH	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	vx
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang dan Perumusan Masalah	1
1.2. Permasalahan	2
1.3. Pembatasan Masalah	4
1.4. Pendekatan Pemecahan Masalah	4
1.5. Tujuan dan Relevansi	6
BAB II SISTEM UMPAN BALIK OPTIMAL KINERJA KUADRATIS	7
2.1. Syarat-Syarat Parameter Sistem	8
2.1.1. Keterkontrolan Sistem	9
2.1.2. Keteramatan Sistem	9
2.1.3. Kestabilan Sistem	10
2.2. Penyelesaian Umpan Balik Optimal indek Kinerja Kuadratis (LQR)	10
2.3. Pemilihan Matriks Pembobot	15
2.3.1. Metode Trial And Error	17
2.3.2. Metode Bryson	20
2.3.3. Metode Eksak	23

BAB III MODEL LINIER SISTEM TENAGA LISTRIK PLTU GRESIK	26
3.1. Komponen Sistem Tenaga Listrik	26
3.1.1. Turbin	26
3.1.2. Generator	27
3.1.3. Eksitasi	29
3.2. Pemodelan Komponen Sistem Tenaga	30
3.2.1. Model Turbin	30
3.2.2. Model Eksitasi	31
3.2.3. Model Dinamik Mesin Sinkron	32
3.2.4. Model Linier Mesin Tunggal PLTU Gresik	37
3.3. Persamaan Keadaan Input Dan Output	39
3.3.1. Komponen Matriks A	39
3.3.2. Komponen Matriks B	42
3.3.3. Komponen Matriks C	43
 BAB IV STUDI SIMULASI DAN ANALISIS	 45
4.1. Algoritma	45
4.2. Perhitungan Parameter Sistem	48
4.3. Data	49
4.4. Penerapan Umpan Balik Optimal Linear Quadratic Regulator	50
4.4.1. Pengujian Nilai Parameter Sistem	50
4.4.2. Simulasi Sistem Dengan Gangguan	51
4.5. Hasil Simulasi Dan Analisis	55
4.5.1. Simulasi Pada Metode Trial And Error	57
4.5.2. Simulasi Pada Metode Bryson	64
4.5.3. Simulasi Pada Metode Eksak	73

BAB V PENUTUP	82
5.1. Kesimpulan	82
5.2. Saran	83
 DAFTAR PUSTAKA	 84
LAMPIRAN	86
L1. Proses Perhitungan K1 - K6	86
L2. Nilai Matriks Q dan R Hasil Simulasi	89

DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN

A	Matriks variabel keadaan.
B	Matriks variabel masukan.
B_g	Matriks variabel gangguan optimal.
E'_g	Tegangan peralihan sumbu quadrature (pu).
E_q	Tegangan sumbu quadrature (pu).
E_{fd}	Tegangan medan eksitasi (pu).
f	Frekuensi.
G	Bagian riil admitansi.
I	Arus (pu).
I_q	Arus sumbu quadrature (pu).
I_d	Arus sumbu direct (pu).
J	Indeks kinerja sistem.
j	Bilangan khayal.
K	Matriks umpan balik optimal.
K_A	Penguatan amplifier.
K_{gu}	Penguatan governor uap.
M	Konstanta inersia.
n	Derajat sistem yang dibahas.
P	Matriks Riccati sistem (aljabar Riccati).
Q	Matriks pembobot variabel keadaan sistem.

R	Matriks pembobot variabel masukan sistem.
R_i	Konstanta pengaturan turbin.
s	Variabel kompleks Laplace.
T	Notasi transpose.
T_A	Konstanta waktu amplifier.
T_m	Torsi mekanik (pu).
T_e	Torsi elektrik (pu).
T_E	Konstanta waktu exciter
T'_{do}	Konstanta waktu peralihan generator (detik).
T_{tu}	Konstanta waktu turbin uap (detik).
T_{gu}	Konstanta waktu generator uap.
$U_1(t)$	Sinyal kontrol sisi turbin.
$U_2(t)$	Sinyal kontrol sisi eksitasi.
$U^*(t)$	Vektor variabel masukan optimal.
$\underline{U}(t)$	Vektor variabel masukan saat ada gangguan.
V	Variabel masukan gangguan.
V_A	Tegangan setelah amplifier
V_T	Tegangan bus.
x'_d	Reaktansi transient sumbu direct.
x_q	Reaktansi sumbu quadrature.
x_{ss}	Vektor variabel keadaan saat pulih (steady state).
$\underline{x}(t)$	Vektor variabel keadaan saat ada pengaruh gangguan.

$x(t_0)$	Kondisi mula vektor variabel keadaan.
$\dot{x}(t)$	Turunan pertama variabel $x(t)$ terhadap waktu.
Y	Ketinggian katub governor.
α_i	Akar persamaan karakteristik sistem lingkaran tertutup.
λ	Akar persamaan karakteristik sistem lingkaran terbuka.
ω_0	Kecepatan sinkron (rad/det).
ω	Kecepatan rotor.
δ	Sudut rotor (rad).
$*$	Simbol keadaan optimal.
Δ	Simbol perubahan kecil.

DAFTAR GAMBAR

GAMBAR	HALAMAN
2.1. Diagram blok sistem tanpa umpan balik	12
2.2. Diagram blok sistem masukan tunggal	15
2.3. Algoritma metode Trial and Error	19
2.4. Algoritma metode Bryson	22
2.5. Algoritma metode Eksak	25
3.1. Skema sebuah sistem turbin sederhana siklus Rankine	27
3.2. Rangkaian Ekuivalen dan diagram fasor mesin sinkron	28
3.3. Sistem eksitasi generator	29
3.4. Diagram blok turbin uap dan pengaturannya	30
3.5. Diagram blok eksitasi tipe 1 IEEE	31
3.6. Diagram blok eksitasi pada PLTU Gresik disederhanakan	32
3.7. Sistem mesin tunggal terhubung infinit bus	32
3.8. Diagram fasor perubahan sudut rotor	33
3.9. Skema daya input output generator	33
3.10. Diagram blok loop mekanik mesin	34
3.11. Diagram blok tegangan terminal	35
3.12. Diagram blok torsi mekanik	36
3.13. Diagram blok tegangan peralihan mesin sinkron	37
3.14. Diagram blok sistem eksitasi dan regulator tegangan	37

3.15. Diagram lengkap model mesin tunggal dengan turbin uap	38
4.1. Penerapan sistem umpan balik LQR pada sistem tenaga listrik	46
4.2. Algoritma penelitian	47
4.3. Proses perhitungan parameter mesin tunggal	48
4.4. Algoritma pengujian parameter mesin	50
4.5. Simulasi sistem terhadap gangguan	51
4.6. Grafik respon waktu sistem tanpa umpan balik K	56
4.7. Sinyal kontrol pada percobaan pertama	58
4.8. Sinyal kontrol pada percobaan kedua	59
4.9. Sinyal kontrol pada percobaan ketiga	60
4.10. Keluaran frekuensi dan tegangan untuk percobaan pertama	61
4.11. Keluaran frekuensi dan tegangan untuk percobaan kedua	62
4.12. Keluaran frekuensi dan tegangan untuk percobaan ketiga	63
4.13. Sinyal kontrol untuk Q_1 dan R_1 secara bryson	66
4.14. Sinyal kontrol untuk Q_2 dan R_2 secara bryson	67
4.15. Sinyal kontrol untuk Q_3 dan R_3 secara bryson	68
4.16. Keluaran frekuensi dan tegangan untuk Q_1 dan R_1	69
4.17. Keluaran frekuensi dan tegangan untuk Q_2 dan R_2	70
4.18. Keluaran frekuensi dan tegangan untuk Q_3 dan R_3	71
4.13. Sinyal kontrol untuk Q_1 metode Eksak	74
4.14. Sinyal kontrol untuk Q_2 metode Eksak	75
4.15. Sinyal kontrol untuk Q_3 metode Eksak	76

4.16. Keluaran frekuensi dan tegangan untuk Q_1	77
4.17. Keluaran frekuensi dan tegangan untuk Q_2	78
4.18. Keluaran frekuensi dan tegangan untuk Q_3	79

DAFTAR TABEL

TABEL

4.1. Data parameter mesin yang diperlukan untuk simulasi	49
4.2. Respon waktu saat terjadinya gangguan tanpa umpan balik optimal	57
4.3. Respon waktu umpan balik optimal pada metode Trial Error	64
4.4. Respon waktu umpan balik optimal pada metode Bryson	72
4.5. Respon waktu menuju kondisi mantap pada metode Eksak	80

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG MASALAH

Dalam sistem tenaga listrik ada gangguan yang bersifat transien dan ada juga gangguan yang bersifat dinamik, yaitu gangguan yang disebabkan oleh perubahan beban yang kecil di sekitar titik kerja, sehingga menimbulkan ayunan (swing). Usaha-usaha untuk memperbaiki penampilan sistem akibat perubahan beban atau gangguan yang kecil tersebut dilakukan dengan sistem kontrol umpan balik optimal melalui konsep indeks kerja minimal LQR , dengan mengontrol tegangan dan frekwensi secara bersama-sama, sehingga ayunan cepat teredam dan sistem lebih cepat mencapai keadaan stabil.

Mempelajari kelakuan dinamik sistem berarti mempelajari kelakuan dinamik semua komponen sistem tenaga listrik yaitu komponen pembangkit, komponen transmisi serta kelakuan dinamiknya sangat ditentukan oleh karakteristik turbin, generator serta karakteristik sistem kendalinya yaitu : governor (pengendali kecepatan putar/frekuensi) dan eksiter (pengendali tegangan). Oleh karena itu mempelajari kelakuan dinamik sistem tidak akan lepas dari mempelajari sistem kendalinya dengan tujuan utama agar dapat mengatur sehingga diperoleh kelakuan dinamik yang terbaik seperti yang diinginkan.

Penggunaan komputer digital dan sistem kontrol optimal dalam kendali sistem tenaga listrik dimungkinkan penerapannya untuk meningkatkan kinerja sistem tenaga listrik terhadap gangguan yang bersifat dinamis. Penerapan umpan balik optimal dengan indeks kinerja LQR (*Linear Quadratic Regulator*) diharapkan dapat mengoptimalkan kinerja sistem (tegangan dan frekuensi) secara serempak hingga ayunan sudut rotor di sekitar kecepatan sinkron akibat perubahan beban kecil dapat segera teredam dan kembali menjadi kondisi mantap.

Pemilihan matriks pembobot pada umpan balik optimal *LQR* dilakukan untuk menentukan desain kontrol yang optimal, tetapi pada umumnya nilai matriks pembobot hanya diasumsikan. Untuk itu diperlukan studi analisis dalam menentukan nilai matriks pembobot, antara lain dengan metode *Trial and Error*, metode *Bryson* dan metode *Eksak* kemudian dibandingkan sehingga menghasilkan indeks kinerja desain kontrol yang paling optimal.

1.2. PERUMUSAN MASALAH

Studi kestabilan biasanya ditinjau dari penyebab gangguan dan pengaruh gangguan digolongkan menjadi tiga jenis yaitu kestabilan dinamik, kestabilan peralihan (*transient*), dan keadaan mantap (*steady state*) [13].

Studi kestabilan peralihan bertujuan untuk menentukan apakah sistem akan tetap dalam keadaan serempak setelah terjadi gangguan berat yaitu gangguan besar dan mendadak, misalnya gangguan sistem transmisi, perubahan beban besar yang mendadak atau keluarnya unit pembangkitan secara mendadak.

Studi kestabilan dinamik adalah untuk mengetahui respon dinamik dari sistem apabila terjadi gangguan yang relatif kecil, gangguan yang bertahap ataupun sesaat. Sering pula dikatakan bahwa fase mantap adalah fase akhir dari fase dinamik. Jadi studi kestabilan dinamik mempelajari kestabilan tempat kedudukan variabel keadaan sistem pada titik kerja, kondisi sistem pada dasarnya selalu berubah di sekitar keadaan tetapnya. Cara yang dilakukan ialah dengan menyelidiki kestabilan sistem tersebut terhadap perubahan kecil di sekitar titik kesetimbangan. Dengan demikian persamaan diferensial non linier dan persamaan aljabar sistem dapat digantikan dengan persamaan linier, yang kemudian dapat diselesaikan dengan metoda analisis linier untuk menentukan apakah sistem akan tetap serempak setelah terjadi perubahan kecil di sekitar titik gangguan.

Dalam studi ini akan dipelajari kemungkinan penerapan konsep umpan balik optimal LQR, yang dibentuk dari model matematis sistem mesin tunggal pada PLTU Gresik yang meliputi turbin dan pengendalinya, mesin sinkron, sistem eksitasi dan sistem jaringan pada infinit bus yang dilinierisasi. Kemudian disusun model dalam bentuk persamaan keadaan. Variabel keadaan yang digunakan dalam pemodelan ini adalah perubahan katup turbin, perubahan torsi mekanik, perubahan sudut rotor, perubahan kecepatan sudut, tegangan peralihan generator dan perubahan tegangan eksitasi. Karena variabel yang diinginkan merupakan besaran yang dapat diukur, maka variabel keadaan sudut rotor dan tegangan peralihan generator yang merupakan besaran tidak terukur harus ditransformasikan ke besaran yang terukur dalam hal ini dipilih daya listrik dan tegangan terminal

generator. Variabel-variabel keadaan ini disusun dalam suatu bentuk persamaan keadaan yang mewakili sistem generator untuk gangguan kecil. Melalui simulasi dapat diketahui stabilitas generator terhadap gangguan.

1.3. PEMBATAAN MASALAH

Model sistem tenaga listrik yang dibahas adalah satu generator yang terhubung dengan *infinite bus* (bus yang mempunyai tegangan dan frekuensi yang konstan). Model generator merupakan pemodelan dinamik untuk gangguan kecil sehingga sistem dianggap sistem linier dan pemodelan mengacu pada model yang sudah ada. Selama gangguan sistem tidak mengalami perubahan dalam arti sistem invarian waktu, sistem dianggap stabil, dengan perubahan-perubahan beban yang terjadi berharga kecil (dinamik) serta beban bersifat statis.

1.4. PENDEKATAN PEMECAHAN MASALAH

Dalam studi Tugas Akhir ini dipergunakan beberapa metode untuk memecahkan masalah-masalah sistem tenaga listrik dalam menghadapi gangguan dinamik. Metode yang digunakan dalam analisis ini adalah :

1. Studi literatur, mempelajari dari literatur tentang *Linear Quadratic Regulator* dan membentuk model persamaan sistem mesin tunggal yang meliputi turbin dan pengendaliannya, sistem eksitasi, dan mesin sinkron yang terhubung pada suatu bus infinite.

2. Menyusun pemodelan linier dinamik dalam bentuk persamaan keadaan

tanpa mengikutsertakan variabel gangguan yaitu :

$$\dot{x}(t) = A x(t) + B u(t) \text{ dan } y(t) = C x(t)$$

dengan,

$\dot{x}(t)$ = turunan pertama vektor keadaan terhadap waktu

$x(t)$ = vektor variabel keadaan

$u(t)$ = vektor variabel masukan

$y(t)$ = vektor variabel pengukuran

A = matriks parameter keadaan

B = matriks parameter masukan

C = matriks parameter pengukuran

t = waktu, variabel bebas.

3. Menentukan nilai matriks pembobot untuk mencari harga penguatan umpan balik optimal K melalui metode LQR . Adapun dalam menentukan matriks pembobot dipergunakan metode :

1. Metode Trial and Error.

2. Metode Bryson.

3. Metode Eksak.

4. Dari ketiga metode ini, sistem diuji dan dianalisis untuk menentukan metode yang paling mudah dalam mencari nilai matriks pembobot untuk mendapatkan respon umpan balik dan keluaran sistem dengan energi minimum dan waktu menuju kestabilan tercepat, dengan memasukkan ke dalam persamaan input-output dan mensimulasikannya ke dalam

komputer melalui bantuan paket program *Matlab for Windows version 4.2c.1.*

1.5. TUJUAN DAN RELEVANSI

Dengan adanya Tugas Akhir ini diharapkan memberikan alternatif pemilihan matriks pembobot dalam usaha perbaikan desain/kinerja dinamik sistem tenaga listrik melalui sistem umpan balik optimal yang diumpankan melewati sisi turbin dan sisi eksitasi pada pemodelan jaringan mesin tunggal PLTU Gresik untuk kemudian dikembangkan pada sistem yang sebenarnya.

BAB II

SISTEM UMPAN BALIK OPTIMAL INDEKS KINERJA KUADRATIS

Sistem yang dibahas dalam bab ini adalah sistem linier, invarian waktu, berderajat n , masukan banyak maupun masukan tunggal. Suatu sistem linier, invarian waktu, masukan banyak, berderajat n , dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan diferensial vektor-matriks :

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (2-1)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (2-2)$$

dengan,

$\mathbf{x}(t)$ = vektor variabel keadaan, $n \times 1$

$\dot{\mathbf{x}}(t)$ = turunan pertama vektor variabel keadaan, $n \times 1$

$\mathbf{u}(t)$ = vektor variabel masukan, $m \times 1$

$\mathbf{y}(t)$ = vektor variabel keluaran, $n \times 1$

\mathbf{A} = matriks parameter keadaan, $n \times n$

\mathbf{B} = matriks parameter masukan, $n \times r$

\mathbf{C} = matriks parameter keluaran, $m \times n$

Pada umumnya, persoalan optimasi sistem kontrol dapat dirumuskan jika diberikan informasi berikut :

1. persamaan keadaan sistem dan persamaan keluaran.
2. vektor kontrol.
3. kendala persoalan.

4. indeks performansi.

5. parameter sistem.

Persoalan kontrol optimal adalah menentukan vektor kontrol optimal $u(t)$ didalam kelompok vektor-vektor yang diperbolehkan. Vektor $u(t)$ biasanya tergantung pada :

1. Keadaan awal atau keluaran awal.
2. Keadaan yang diinginkan atau keluaran yang diinginkan.
3. Sifat indeks performansi.

2.1. SYARAT-SYARAT PARAMETER SISTEM [10]

Salah satu syarat utama dalam penerapan sistem pengaturan optimal terhadap suatu sistem yang akan dikontrol adalah keterkontrolan, keteramatan. Hal ini karena jawaban dari suatu persoalan kontrol optimal mungkin tidak ada jika sistem yang ditinjau tidak dapat dikontrol.

Konsep keterkontrolan (*controllability*) dan keteramatan (*observability*) pertama-tama dikenalkan oleh Kalman. Konsep ini amat penting dalam sistem pengaturan optimal, terutama pada sistem berorde banyak karena keberadaan dari penyelesaian sistem optimal bergantung pada kondisi keterkontrolan dan keteramatan.

2.1.1. Keterkontrolan

Persamaan (2-1) diatas disebut terkontrol pada saat $t = t_0$ bila kita dapat menentukan sinyal kontrol yang akan memindahkan suatu keadaan awal ke keadaan akhir sembarang dalam selang waktu terhingga t_0 atau dengan kata lain dalam kurun waktu $t_0 \leq t \leq t$, ada fungsi masukan kontinu $u(t)$ yang dapat mengontrol $\underline{x}(t)$ bertransisi dari $\underline{x}(t_0)$ menuju nilai tertentu $\underline{x}(t_f)$.

Adapun syarat dari sistem terkontrol apabila *rank* dari matriks $n \times n$ harus sama dengan n .

$$\text{rank } [B|AB|\dots|A^{n-1}B] = n \quad (2-3)$$

Dalam desain praktis sistem kontrol, keterkontrolan keadaan secara sempurna adalah tidak cukup untuk mengontrol keluaran sistem, untuk itu didefinisikan secara terpisah keterkontrolan keluaran sistem secara sempurna. Keluaran sistem disebut terkontrol sempurna jika dapat ditentukan vektor kontrol tanpa kendala $u(t)$ yang akan memindahkan setiap keluaran awal $y(t_0)$ ke suatu keluaran akhir $y(t_f)$ dalam selang waktu yang terhingga $t_0 \leq t \leq t$. Sistem tersebut terkontrol sempurna apabila matriks $m \times (n+1)r$ mempunyai nilai *rank* sama dengan n .

$$\text{rank } [CB|CAB|CA^2B|\dots|CA^{n-1}B|D] = m \quad (2-4)$$

2.1.2. Keteramatan Sistem

Sistem dikatakan teramati sempurna jika setiap keadaan awal $x(0)$ dapat ditentukan dari pengamatan $y(t)$ selama selang waktu terhingga. Oleh karena itu, sistem teramati sempurna apabila setiap elemen variabel keadaan mempengaruhi setiap elemen vektor keluaran.

Syarat keteramatan sempurna adalah sebagai berikut : sistem yang dinyatakan oleh persamaan (2-1) dan (2-2) teramati sempurna jika dan hanya jika matriks $n \times nm$ mempunyai $rank = n$.

$$rank [C' | A'C' | \dots | (A')^{n-1} C'] = n \quad (2-5)$$

2.1. 3. Kestabilan Sistem

Salah satu hal yang harus dilakukan dalam penerapan kontrol dengan indeks kinerja kuadratis yaitu memeriksa apakah sistem tersebut dalam batas-batas kestabilan. Suatu sistem dikatakan stabil apabila sistem seperti persamaan (2-1) di atas memiliki akar-akar loop terbuka (*eigen value*) pada daerah nyata negatif atau sebelah kiri busur khayal bidang kompleks.

$$| Is - A | = 0 \quad (2-6)$$

dengan,

s adalah nilai akar-akar persamaan sistem loop terbuka

I adalah matriks identitas

2.2. PENYELESAIAN UMPAN BALIK OPTIMAL INDEKS KINERJA KUADRATIS (*LQR*)

Teori kontrol modern memungkinkan untuk mendesain sistem kontrol optimal terhadap indeks kinerja yang diberikan dan didasarkan pada deskripsi persamaan sistem dalam bentuk n persamaan diferensial orde pertama yang dapat digabung menjadi persamaan diferensial matriks-vektor orde pertama. Penyajian

dalam bentuk matriks ini akan sangat mempermudah persamaan matematis, penambahan banyaknya variabel keadaan, masukan atau banyaknya keluaran tidak menambah kekompleks-an persamaan [10].

Teori kontrol optimal bertujuan untuk mencari suatu aturan kontrol yang meminimisasi suatu indeks kinerja tertentu pada sistem. Ditinjau dari indeks kinerja yang diminimisasi, ada beberapa jenis sistem kontrol optimal yang telah berkembang luas yaitu, sistem kontrol optimal waktu, sistem kontrol optimal energi, dan sistem kontrol optimal dengan indeks kinerja *Linear Quadratic Regulator*. Dalam pembahasan teori kontrol optimal di sini dipilih sistem kontrol optimal menggunakan indeks kinerja *Linear Quadratic Regulator*.

Salah satu bagian penting teori kontrol optimal adalah masalah regulator optimal. Masalah regulator adalah menentukan aturan kontrol yang membuat variabel dapat diatur sesuai dengan referensi tertentu yang konstan. Dari sini inti masalahnya adalah mengembalikan *state* atau *output* sistem ke keadaan semula jika terjadi gangguan dinamis pada sistem tersebut. Regulator optimal berubah waktu dengan indeks kinerja *Linear Quadratic Regulator* adalah kontrol optimal yang membuat variabel dapat diatur sesuai dengan referensi tertentu dan meminimisasi indeks kinerja untuk suatu sistem linier.

Persamaan (2-1) apabila dituliskan dalam kawasan frekuensi dengan asumsi (Gambar 2.1) parameter keadaan matriks A , matriks parameter masukan B , dan matriks parameter keluaran C konstan maka:

$$s X(s) - X_0 = A X(s) + B U(s) \quad (2-7)$$

dengan $x(0) = X_0$ yang diketahui sebagai kondisi awal, dan matriks identitas I berorde $n \times n$ maka dapat ditulis:

$$s I X(s) - A X(s) = X_0 + B U(s)$$

$$(s I - A) X(s) = X_0 + B U(s)$$

$$X(s) = (s I - A)^{-1} X_0 + (s I - A)^{-1} B U(s) \quad (2-8)$$

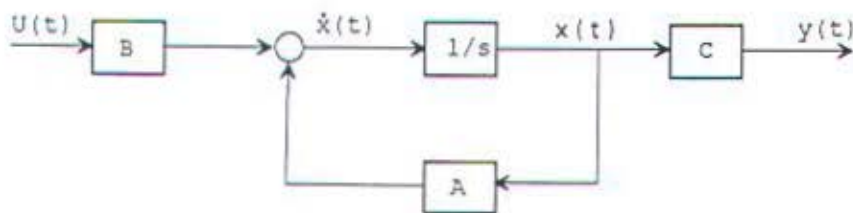
Persamaan ini menghasilkan akar-akar karakteristik dengan determinan :

$$| s I - A | = 0 \quad (2-9)$$

atau

$$(s - \lambda_1) (s - \lambda_2) \dots (s - \lambda_n) = 0 \quad (2-10)$$

dengan $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ didefinisikan sebagai akar-akar karakteristik sistem lingkaran terbuka (tanpa umpan balik K).



Gambar 2.1. Diagram blok sistem linier tanpa umpan balik

Permasalahan pada sistem kontrol optimal tidak hanya sistem harus mempunyai solusi dan dapat dikontrol, tetapi sistem juga harus mempunyai tolak ukur yang merupakan ukuran apakah penampilan sistem telah memenuhi persyaratan optimal, dan menentukan variabel masukan $u(t)$ yang dapat

menghasilkan tolok ukur penampilan optimal. Sistem kontrol optimal yang dapat dikontrol dan mempunyai tolok ukur penampilan kuadratik :

$$J = \int_{t_0}^{t_f} [\underline{x}^T(t) Q \underline{x}(t) + \underline{u}^T(t) R \underline{u}(t)] dt \quad (2-11)$$

dengan,

Q matriks bobot, $n \times n$, *semidefinit positif*

R matriks bobot, $m \times m$, *definit positif*

$t_0 = 0$ saat mula

$t_f = \sim$ saat akhir

Tolok ukur ini bertujuan untuk menghasilkan penampilan dengan penyimpangan minimal terhadap titik kerja dan energi masukan minimal. Tolok ukur ini akan optimal bila variabel masukan berbentuk :

$$U^*(t) = -K \underline{x}(t) \quad (2-12)$$

dan matriks feedback :

$$K = R^{-1} B^T P \quad (2-13)$$

dengan matriks P merupakan jawab dari persamaan Riccati :

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P = -Q \quad (2-14)$$

Sistem dengan persamaan (2-1) setelah diberi variabel masukan $\underline{u}(t)$ dengan bentuk (2-12), menjadi sistem umpan balik atau sistem lingkaran tertutup seperti Gambar

2.2. yang mempunyai persamaan keadaan :

$$\dot{\underline{x}}(t) = (A - BK^T) \underline{x}(t) \quad (2-15)$$

Sistem lingkaran tertutup ini, mempunyai akar-akar persamaan karakteristik $\alpha_1, \dots, \alpha_n$

yang dapat ditentukan dari :

$$\det. (Is - (A - BK^T)) = 0 \quad (2-16)$$

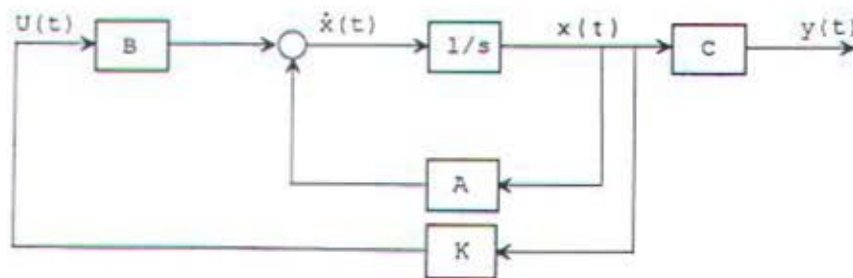
$$|Is - (A - BK^T)| = 0 \quad (2-17)$$

$$(s-\alpha_1)(s-\alpha_2)\dots(s-\alpha_n) = 0 \quad (2-18)$$

Akar-akar $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ ini bersama-sama kondisi mula $x(0)$ menentukan suatu solusi (respon waktu) sistem $\underline{x}(t)$. Dari persamaan (2-1)-(2-12), kemudian dengan memilih melalui perhitungan nilai dari matriks pembobotnya Q dan R dari metode yang telah ditentukan, maka matriks P dapat dihitung serta matriks umpan balik optimal kontrol K dapat ditentukan. Pada umumnya respons waktu yang diperoleh tidak sesuai dengan yang diinginkan, walaupun sistem memenuhi persyaratan optimal.

Sebaliknya bila akar-akar $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ ditentukan agar respons waktu sesuai dengan yang diinginkan, dari persamaan (2-14)-(2-16) matriks feedback K dapat dihitung. Namun sistem lingkaran tertutup yang diperoleh belum tentu optimal menurut persamaan (2-12). Oleh karena itu diperlukan suatu rancangan yang sistematis dan mudah dalam menghitung harga K, Q, R untuk mencapai kondisi optimal dengan respons waktu yang sesuai. Untuk mendapatkan rancangan agar sistem kontrol yang mempunyai tolok ukur penampilan kuadratik optimal dan sekaligus mempunyai respons waktu sesuai dengan yang diinginkan, perlu dicari hubungan dalam suatu persamaan yang sederhana antara letak akar-akar sistem, respons waktu, matriks *feedback* dan matriks pembobotnya. Hubungan-hubungan tersebut terutama mengenai letak akar-akar dengan matriks *feedback*, solusi persamaan Riccati. Sistem kontrol optimal masukan banyak ekuivalen dengan sistem

kontrol optimal masukan tunggal, bila akar-akar persamaan karakteristik sistem lingkaran tertutup dan tolok ukur penampilan kedua sistem tersebut sama [16].



Gambar 2.2. Diagram blok sistem dengan umpan balik

2.3. PEMILIHAN MATRIKS PEMBOBOT

Definisi dari pada matriks adalah sekumpulan bilangan-bilangan yang disusun secara khusus yakni dalam bentuk baris dan kolom sehingga berbentuk persegi panjang. Dalam studi ini ada beberapa jenis matriks yang dipakai berdasarkan susunan elemennya antara lain [15]:

1. Matriks bujursangkar, yaitu : apabila jumlah baris = jumlah kolom ($m = n$).

contoh :

$$\begin{bmatrix} 1 & 3 & 6 \\ 5 & 6 & 3 \\ 4 & 0 & 7 \end{bmatrix}$$

2. Matriks diagonal, yaitu : apabila semua elemen dari matriks berharga nol kecuali elemen-elemen diagonalnya.

contoh :

$$\begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2 \end{bmatrix}$$

3. Matriks Identitas, yaitu matriks diagonal yang elemen-elemen diagonalnya bernilai satu.

contoh :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4. Matriks Simetris, yaitu matriks bujur sangkar yang bernilai elemen $a_{ij} = a_{ji}$ untuk semua $i \times j$.

contoh :

$$\begin{bmatrix} 7 & 5 & 6 \\ 5 & 7 & 4 \\ 6 & 4 & 2 \end{bmatrix}$$

Matriks pembobot dari suatu sistem umpan balik optimal LQR dipilih untuk menentukan karakteristik desain kontrol sistem atau indeks kinerja sistem. Dengan mendapatkan matriks Q dan R maka solusi riccati matriks P dapat dihitung dan nilai gain feedback K dapat ditentukan, kemudian sinyal variabel kontrolnya dapat juga didapat untuk memperoleh kinerja sistem yang optimal. Jadi dengan memilih matrik Q dan R maka dapat mentukan nilai kinerja sistem yang diinginkan. Adapun syarat dari matriks pembobot adalah :

1. Matriks simetri
2. Matriks Q yaitu matriks $n \times n$ dan bersifat *semi-definit positif*, yaitu setiap minor dari matriks Q mempunyai nilai determinan lebih besar sama dengan nol.
3. Matriks R $m \times m$ dan bersifat *definit positif*, yaitu nilai determinan dari tiap-tiap minornya harus lebih besar dari nol.

Untuk menentukan matriks pembobot tersebut dalam studi ini dicari dengan tiga cara atau metode, yaitu :

1. Metode Trial And Error
2. Metode Bryson
3. Metode Eksak

Sesuai dengan uraian di atas maka dapat dikatakan matriks pembobot merupakan nilai-nilai elemen matriks yang menentukan kinerja sistem dengan umpan balik optimal apabila mengalami gangguan dan dari pengalaman oleh perancangnya dipilih berupa matriks diagonal, tetapi matriks pembobot tidak mutlak diagonal. Alasan pemilihan matriks diagonal positif karena hal ini memenuhi syarat-syarat sebagai matriks pembobot di atas.

2.3.1. Metode Trial And Error

Metode ini merupakan metode yang sangat sederhana dan praktis, dilakukan dengan memilih komponen matriks pembobot secara coba-coba sesuai dengan keluaran yang diinginkan relatif terhadap keluaran sebelumnya. Metode ini

mempunyai kelemahan pemilihan harga matriks yang berulang-ulang. Namun karena perkembangan komputer digital telah mampu mengatasi perhitungan yang rumit atau berulang ulang kelemahan ini dapat diatasi dengan melihat respons keluaran sistem terhadap perubahan matriks pembobot.

Ada beberapa kaidah yang bermanfaat dalam penentuan matriks pembobot sehingga mendekati harga yang diinginkan (minimisasi) :

1. Harga matriks pembobot Q dipilih harga yang besar maka, akan menyebabkan penguatan umpan balik membesar.
2. Apabila matriks pembobot R dipilih besar maka, penguatan kontrol umpan balik K mengecil sehingga tanggapan sistem menjadi lebih lamban.

Dengan mengetahui pemodelan dari sistem maka akan didapat persamaan *state space*-nya, dan dari data diketahui nilai parameter keadaan sistem (A), variabel keadaan sistem $x(t)$, dan parameter masukan (B), maka langkah selanjutnya sebagai berikut :

i. Memilih nilai matrik Q dan R secara coba-coba.

ii. Menyelesaikan persamaan Riccati :

$$A^T P + PA - PBR^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (2-18)$$

$$K = -R^{-1} B^T P \quad (2-19)$$

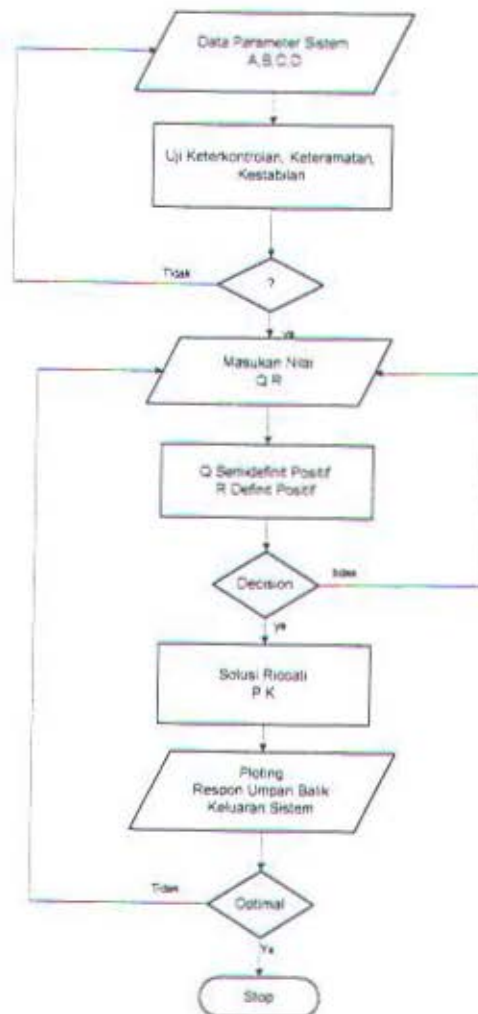
dan nilai matriks umpan balik :

$$\underline{u} = -k \underline{x}(t) \quad (2-20)$$

- iii. Dari nilai respon umpan balik dan keluaran sistem maka dapat diketahui nilai performansi dari sistem tersebut yaitu :

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (2-21)$$

- iv. Bila respon dan keluaran sistem tidak optimal, masukan nilai Q dan R seperti langkah (i) sampai diperoleh respon waktu keluaran yang diinginkan dengan indeks kinerja/penampilan yang minimal.



Gambar 2.3. Diagram alir metode Trial And Error

2.3.2. Metode Bryson

Metode ini merupakan proses yang berulang atau bertingkat dengan suatu algoritma tertentu dalam menentukan nilai matriks Q dan R . Sebagai harga awal diasumsikan dulu nilai Q dan R seperti pada metode *Try and Error*, dan berdasarkan nilai deviasi variabel keadaan maksimal dan deviasi masukan awal maksimal, kemudian baru dihitung nilai Q dan R yang sebenarnya. Asumsi harga indeks matriks pembobot [6]:

$$Q = \text{rill}(n \times n)$$

$$R = \text{rill}(m \times m)$$

$$Q = \text{diag}\{q_1, q_2, \dots, q_n\}$$

$$R = \text{diag}\{r_1, r_2, \dots, r_m\}$$

Adapun algoritmanya sebagai berikut :

- (i). Menghitung harga deviasi maksimum yang diijinkan yaitu :

$$x_i(\text{mak}), i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$u_j(\text{mak}), j = 1, 2, 3, \dots, m$$

- (ii). Harga matriks pembobot yang diberikan adalah :

$$\left\{ q_i = \frac{1}{x_i^2(\text{maks})} \right\}_{i=1}^n ; \left\{ r_j = \frac{1}{u_j^2(\text{maks})} \right\}_{j=1}^m \quad (2-22)$$

- (iii). Menyelesaikan masalah state regulator dengan indeks kinerja kuadratis, untuk mendapatkan nilai persamaan aljabar riccati P dan nilai gain matriks umpan balik K . Dari hal ini diperoleh nilai respon umpan balik

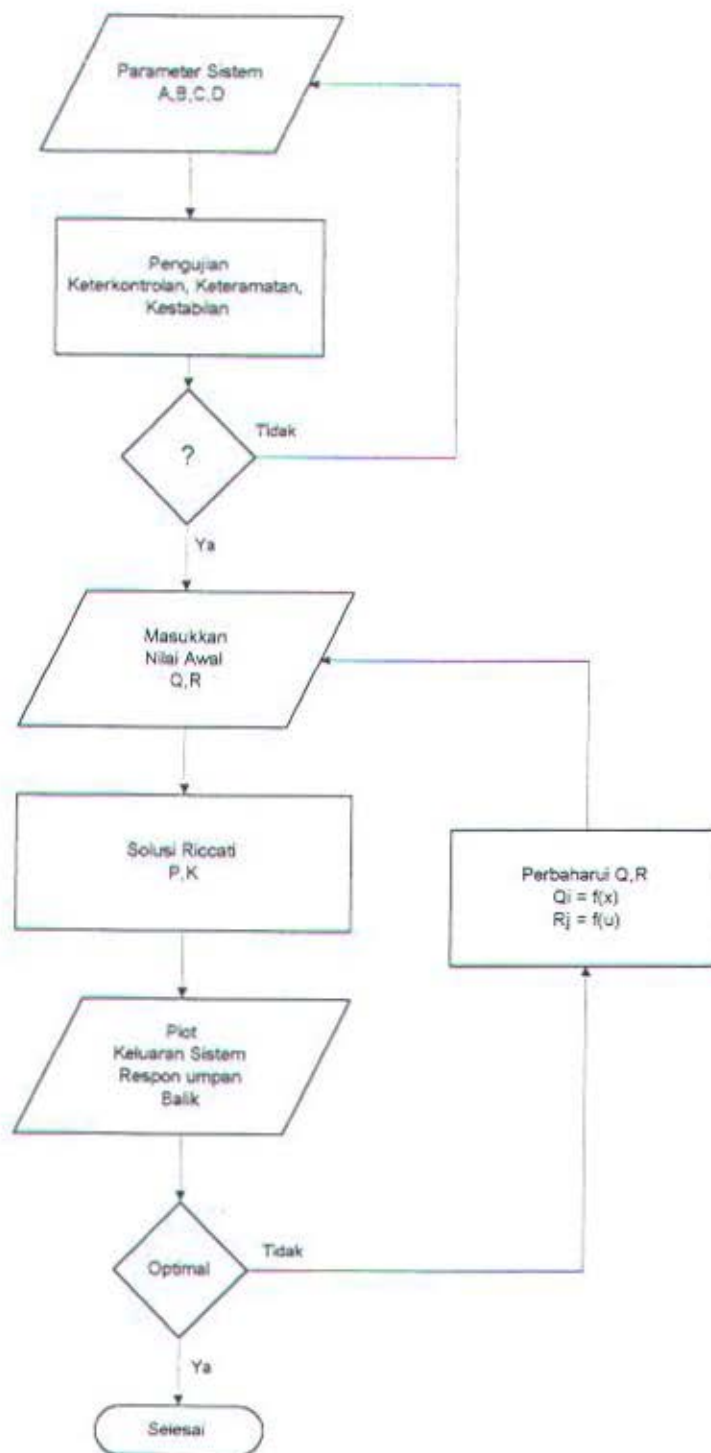
$u(t)$ dan waktu keluaran sistem sesuai dengan indeks kinerja minimal yaitu :

$$J = \sum_{i=1}^n \int_0^{\infty} q_i x_i^2(t) dt + \sum_{j=1}^m \int_0^{\infty} r_j u_j^2(t) dt \quad (2-23)$$

- (iv). Bila respon waktu yang diperoleh tidak memuaskan maka harga pembobot Q dan R dimodifikasi lagi dengan memakai deviasi variabel keadaan maksimum dan deviasi variabel masukan maksimum yang diperoleh dari iterasi sesuai algoritma di atas.
- (v). Ulangi langkah (i) sampai (iv) sampai diperoleh respon umpan balik dan respon waktu keluaran sistem sesuai dengan yang minimal/diinginkan.

Dari algoritma di atas, metode Bryson merupakan metode alternatif yang sederhana dalam proses pemilihan matriks pembobot, yaitu berdasarkan keluaran sistem dari proses iterasi yang berulang hingga mencapai indeks kinerja yang dikehendaki.

Penaikkan harga matriks bobot Q atau penurunan harga matriks bobot R dari hasil iterasi tersebut pada umumnya masih bergerak dalam daerah *pole* lingkaran tertutup sepanjang daerah optimal, berikut adalah diagram alir dari pada metode Bryson.



Gambar 2.4. Diagram alir Metode Bryson

2.3.3. Metode Eksak

Metode ini mencapai kedudukan akar-akar dengan menggunakan cara eksplisit terhadap elemen matriks pembobot Q , yaitu matriks pembobot Q diperoleh dengan menentukan nilai eigen (akar-akar) sistem lingkaran tertutup yang diinginkan relatif terhadap nilai eigen sistem sebelumnya. Sistem lingkaran tertutup sebelumnya yang dimaksud adalah sistem umpan balik dengan matriks pembobot diberikan secara asumsi/coba-coba. Ada dua teori yang mendukung metode ini yaitu dari *Solheim* dan *Woodhead-Porter*, yang mana kedua teori ini didasarkan pada transformasi penjabaran sistem linear. *Solheim* melakukan pendekatan dengan persamaan multi input multi output, sedangkan *Woodhead-Porter* menerapkan melalui persamaan sistem multi output masukan tunggal [6].

Algoritma,

Inisialisasi, $Q = Q_0$, $K = K_0$, $R > 1$, $k = \text{indeks iterasi}$

- (i). Memperbaharui matriks parameter sistem untuk mengetahui nilai akar-akar sistem loop tertutup

$$A_k = A - BK \quad (2-24)$$

- (ii) Menghitung nilai eigen/vektor eigen :

$$\lambda_k = \text{diag} \{ \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n \}$$

$$\{ \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n \}: \text{nilai eigen}$$

$$T_k = [t_1, \dots, t_n], \text{ riil } (n \times n)$$

$$T_k = \text{nilai vektor Eigen}$$

dan matriks konstanta :

$$H_k = T_k^{-1} B R^{-1} B^T [T_k^{-1}]^T \quad (2-25)$$

(iii) Perbaharui k , untuk $k = k+1$

(iv) Menggeser nilai eigen menuju lokasi akar-akar yang diinginkan (α_i),

$$q_i^k = \frac{\alpha_i^2 - \lambda_i^2}{h_{ii}^{k-1}} \quad (2-26)$$

h_{ii} = harga komponen diagonal matriks H_k

(v) Menyusun elemen matriks Q_k yang diperoleh dari persamaan di atas

$$Q_k = \text{diag} \{0, 0, \dots, q_i^k\} \quad (2-27)$$

$$P_k \lambda_{k-1} + \lambda_{k-1} P_k - P_k B_k R^{-1} (B_k)^T P_k + Q$$

$$K_k = \bar{K}_k T_k^{-1} \left(\bar{K}_k = R^{-1} B_k^T P_k \right) \quad (2-28)$$

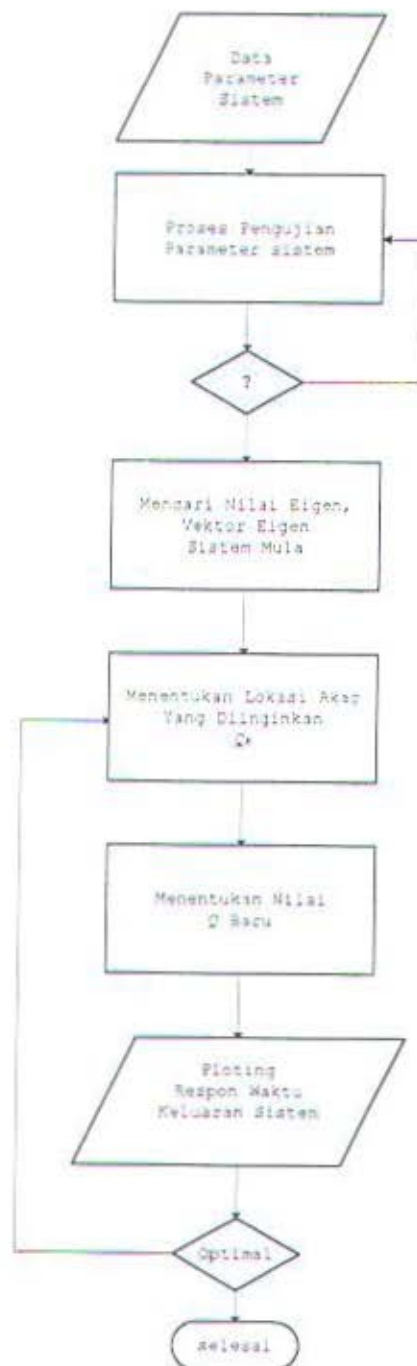
(vi) Nilai matriks pembobot yang sebenarnya Q diperoleh :

$$K = K + K_k \quad (2-29)$$

$$Q_k = T_k^{-1} \bar{Q}_k T_k^{-1} \quad (2-30)$$

$$Q = Q + Q_k \quad (2-31)$$

Untuk menentukan nilai/lokasi akar-akar yang diinginkan yaitu dengan menggeser nilai akar-akar sebelumnya sepanjang daerah stabil yaitu bidang kiri/negatif bidang kompleks root locus, untuk perbedaan lokasi akar-akar akan menghasilkan matriks Q yang berbeda. Apabila hasil yang diperoleh belum memuaskan, maka akar-akar digeser lagi sesuai karakteristik sistem yang diperlukan. Meskipun nilai matriks Q_k diagonal, tetapi nilai matriks pembobot Q tidak diagonal, hal ini tidak aneh, karena nilai matriks pembobot tidak harus diagonal. Demikian metode dari *Solheim*, *Woodhead* dan *Porter* ini disebut metode eksak dan dalam diagram alir adalah sebagai berikut :



Gambar 2.6. Diagram alir Metode Eksak

BAB III

MODEL DINAMIK SISTEM PLTU GRESIK

3.1. KOMPONEN SISTEM TENAGA LISTRIK

Kelakuan dinamik sistem tenaga listrik sangat dipengaruhi oleh komponen tenaga listrik itu sendiri, dan sangat ditentukan oleh karakteristik turbin, generator serta komponen kendali yaitu *governor* (pengendali kecepatan putar/frekuensi), *eksiter* (pengendali tegangan). Oleh karena itu mempelajari kelakuan dinamik sistem tidak akan lepas dari mempelajari sistem kendalinya dengan tujuan utama agar dapat diatur sehingga diperoleh kelakuan dinamik sistem yang terbaik seperti yang diinginkan.

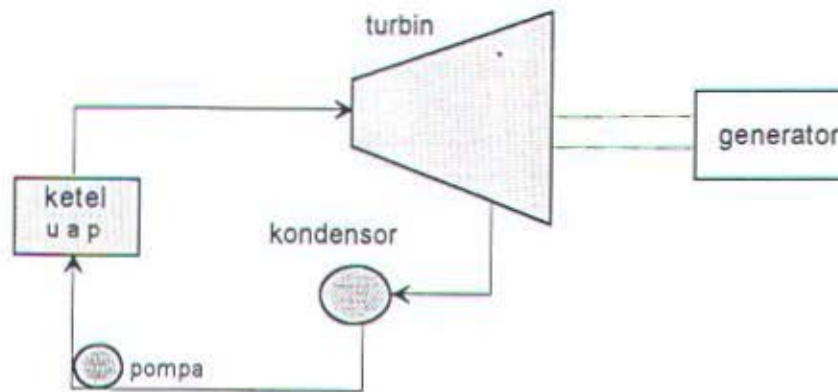
3.1.1. Turbin

Dilihat dari sumber energinya, jenis turbin pada pembangkit tenaga listrik dapat dibedakan menjadi :

- Turbin air
- Turbin uap (gas)

Secara umum, dalam analisa sistem tenaga listrik yang menjadi perhatian utama adalah pengaturan kecepatan putar turbin. Gambar rangkaian sederhana dari turbin uap diperlihatkan dalam Gambar 3.1. Sistem turbin uap pada Gambar 3.1. terdiri

dari beberapa komponen utama, yaitu : ketel, turbin yang menggerakkan beban (generator), kondensor dan pompa air ketel.



Gambar 3.1. Skema sebuah sistem turbin uap sederhana berdasarkan siklus Rankine [14]

Uap yang berfungsi sebagai fluida kerja turbin dihasilkan oleh ketel uap, yaitu alat yang mengubah air menjadi uap. Di dalam turbin, tekanan dan temperatur akan menurun karena terjadi pelepasan energi untuk memutar beban. Uap dari turbin mengalir ke kondensor untuk didinginkan kemudian dipompakan kembali ke ketel uap. Pengaturan turbin dilaksanakan dengan mengatur pemasukkan uap ke dalam turbin melalui pengaturan katup.

3.1.2. Generator

Generator yang digerakkan oleh turbin adalah suatu alat yang mengubah energi mekanis menjadi energi listrik, dan generator yang biasa digunakan adalah generator sinkron. Pada generator sinkron terdapat percepatan daya akibat

perbedaan antara daya masukan (daya poros) dan daya keluaran (daya listrik)

yaitu sebesar :

$$\alpha = \frac{P_a}{M} = \frac{(P_m - P_a)}{M}$$

$$\omega = \frac{d\delta}{dt} ; \alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\delta}{dt^2}$$

dengan :

α = percepatan sudut

M = momentum angular

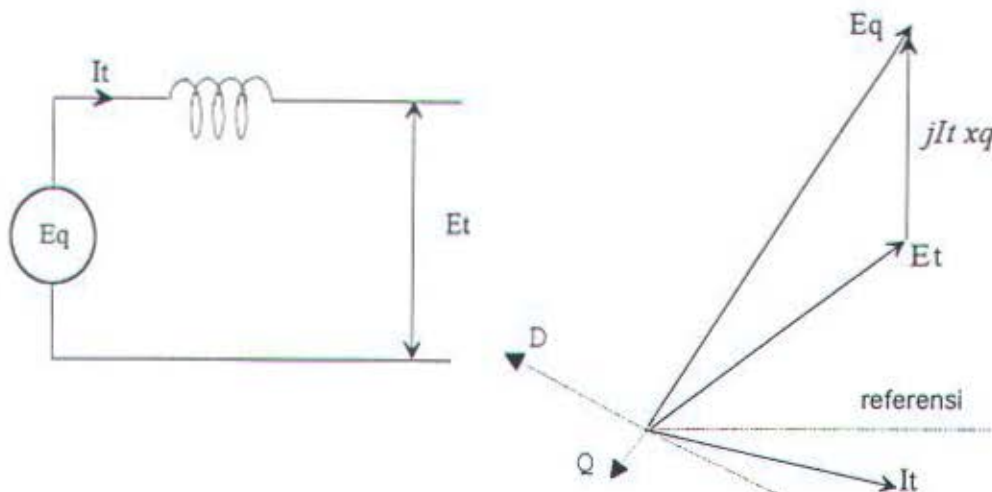
δ = sudut rotor

Bila komponen *damping*/redaman dimasukkan maka diperoleh

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{M}(P_m - P_e - D\omega) \quad (3-1)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega \quad (3-2)$$

Untuk studi kestabilan dinamik dengan mengabaikan resistansi stator dan kumparan peredam, mesin sinkron dapat direpresentasikan seperti Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Rangkaian ekuivalen dan diagram phasor mesin sinkron

Dari diagram phasor :

$$E_q = E_t + jx_q I_t \quad (3-3)$$

dengan,

E_q : tegangan dibelakang reaktansi sinkron sumbu quadratur

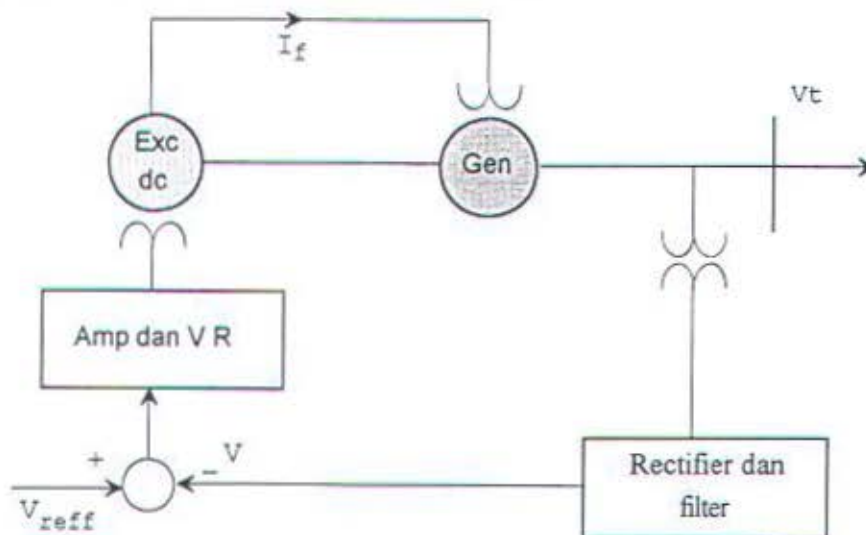
E_t : regangan terminal mesin sinkron

x_q : reaktansi sinkron sumbu quadratur

I_t : arus terminal mesin

3.1.3. Sistem Eksitasi

Sistem eksitasi yang sering digunakan dalam studi stabilitas dinamik sistem tenaga diperlihatkan pada Gambar 3.3. di bawah ini.



Gambar 3.3. Sistem eksitasi generator

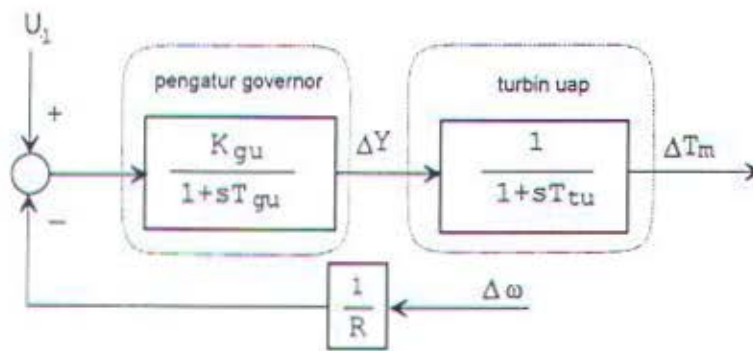
Sistem eksitasi di atas menggunakan generator arus searah yang dikopel dengan generator sinkron (generator utama). Beban dari generator arus searah

adalah belitan medan eksitasi generator sinkron. Pengaturan tegangan eksitasi generator arus searah dapat diatur. Sehingga fluksi yang diimbaskan ke stator generator sinkron berubah, yang mengakibatkan tegangan yang dibangkitkan pada terminal generator sinkron dapat diatur.

3.2. PEMODELAN KOMPONEN SISTEM TENAGA

3.2.1. Model Turbin

Pemodelan linier turbin tergantung pada jenis, tipe turbin serta tingkat ketelitian yang diinginkan. Gambar 3.4 merupakan diagram blok turbin uap dan pengaturnya yang mengacu pada model IEEE [7].



Gambar 3.4. Diagram blok turbin uap dan pengaturnya

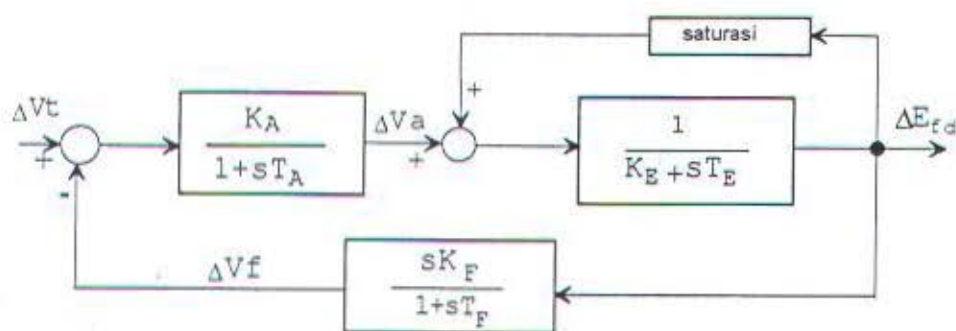
Dengan K_{gu} , T_{gu} , T_{tu} masing-masing merupakan konstanta penguatan pengatur turbin uap, waktu tanggap pengatur turbin uap, dan waktu tanggap turbin uap. Dari Gambar 3.4 dapat dijabarkan menjadi :

$$\Delta T_m^* = \frac{\Delta Y}{T_{tu}} - \frac{\Delta T_m}{T_{tu}} \quad (3.4)$$

$$\Delta Y^* = \frac{K_{gu} \Delta U}{T_{gu}} - \frac{K_{gu} \Delta \omega}{t_{gu} R} - \frac{\Delta Y}{T_{gu}} \quad (3.5)$$

3.2.2. Model Eksitasi

Model eksitasi yang sering dipakai dalam analisis kestabilan dinamis mengacu pada model IEEE [7] adalah sistem eksitasi tipe 1. Sistem eksitasi generator pada PLTU Gresik menggunakan sistem eksitasi statis. Sumber daya diambil dari terminal generator ataupun dari luar yang disearahkan dengan suatu penyearah untuk mendapatkan arus searah guna penguatan medan utama generator.



Gambar 3.5. Diagram blok eksitasi type 1 IEEE

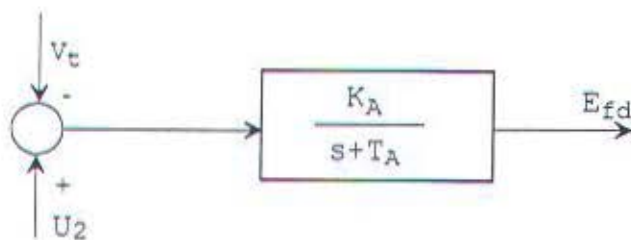
keterangan :

- K_F = konstanta penguat filter
- T_F = waktu tanggap filter
- T_E = waktu tanggap eksitasi
- K_E = konstanta penguatan eksitasi
- T_A = waktu tanggap amplifier
- K_A = konstanta penguatan amplifier
- ΔE_{fd} = perubahan tegangan medan eksitasi
- ΔV_A = perubahan tegangan setelah penguat

ΔV_t = perubahan tegangan terminal

ΔE_f = perubahan tegangan setelah filter

Output dari PT (*potensial transformer*) disearahkan dan difilter sebagai masukan rangkaian pembanding, dan keluaran rangkaian pembanding diperkuat sebagai sumber eksitasi. Sistem eksitasi ini mempunyai fungsi utama untuk mengatur tegangan dan arus eksitasi dengan respon yang cepat sehingga memungkinkan pemakaiannya untuk sistem eksitasi tegangan tinggi.

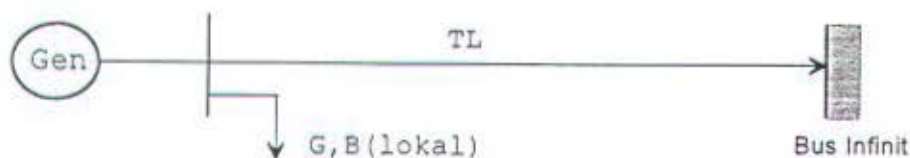


Gambar 3.6. Diagram blok eksitasi pada PLTU Gresik setelah disederhanakan

3.2.3. Model Dinamik Mesin Sinkron

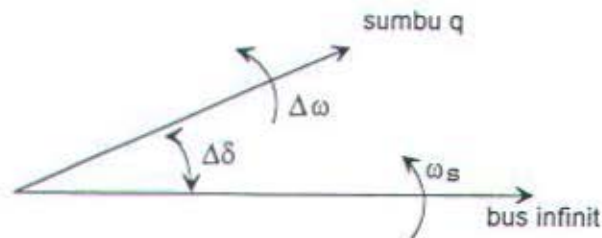
3.2.3.1. Model Torsi Mekanik

Model mesin sinkron untuk model satu mesin terhubung ke infinit bus mengacu pada model yang diturunkan oleh De Mello dan Concordia [4,8].



Gambar 3.7. Sistem mesin tunggal terhubung dengan infinit bus

Diagram phasor untuk perubahan sudut rotor yang disebabkan oleh perubahan kecepatan putaran turbin dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 3.8. *Phasor perubahan sudut rotor*

sehingga dapat diturunkan rumus :

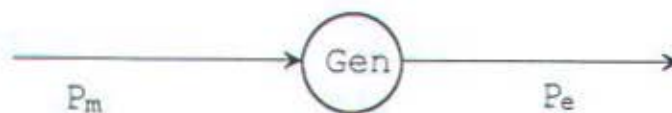
$$\frac{d\Delta\delta}{dt} = \omega_s \Delta\omega \quad (3-6)$$

dengan,

$\Delta\omega$: perubahan kecepatan sudut

$\Delta\delta$: perubahan kedudukan rotor mesin sinkron

ω_s : kecepatan sinkron



Gambar 3.9. *Skema daya input output generator*

persamaan torsi mekanik dan elektrik dapat diturunkan sebagai berikut :

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega}{dt} + d\omega$$

sedang persamaan torsi dasarnya :

$$T_e = \frac{P_b}{\omega_b} ; \omega_b = \omega$$

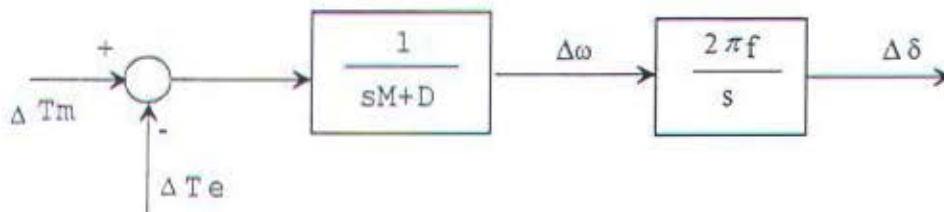
Setelah dilinierisasi,

$$\Delta T_m - \Delta T_e = M \frac{d\Delta\omega}{dt} + D\Delta\omega \quad (3-7)$$

Dengan menggunakan transformasi Laplace pada persamaan-persamaan di atas diperoleh :

$$\begin{aligned} \Delta\delta &= \frac{2\pi f}{s} \Delta\omega \\ \Delta T_m - \Delta T_e &= (sM + D)\Delta\omega \end{aligned} \quad (3-8)$$

Diagram blok loop mekanik mesin sinkron dapat digambarkan seperti di bawah ini:



Gambar 3.10. Diagram blok diagram loop mekanik mesin [8]

3.2.3.2. Model Dari Persamaan Tegangan Terminal

Tegangan terminal pada bus dalam koordinat d - q adalah sebagai berikut :

$$V_t = V_d + V_q$$

$$V_t^2 = V_d^2 + V_q^2$$

dengan melinierisasi persamaan tegangan terminal ini, diperoleh :

$$V_t \Delta V_t = V_d \Delta V_d + V_q \Delta V_q$$

$$V_d = X_q I_q$$

$$\Delta V_d = x_q \Delta I_q$$

$$V_q = E_q - x_d I$$

$$= E'_q - x'_d I$$

$$\Delta V_q = \Delta E'_q - x'_d \Delta I_d$$

maka persamaan tegangan terminal menjadi :

$$V_t \Delta V_t = V_d x_q \Delta I_q + V_q \Delta E'_q - V_q x'_d \Delta I_d \quad (3-9)$$

Dengan memasukkan persamaan arus ke dalam persamaan dasar 3-9, akan diperoleh :

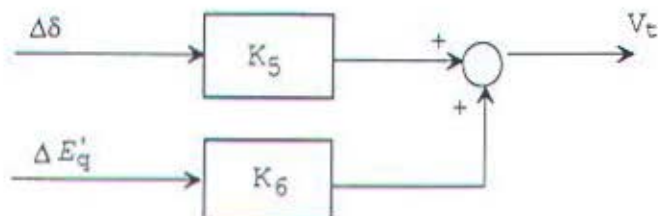
$$\Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q \quad (3-10)$$

dengan,

K_5 : gain sensitifitas tegangan medan mesin terhadap perubahan sudut rotor.

K_6 : gain sensitifitas tegangan medan mesin terhadap perubahan *flux linkage* mesin.

sehingga diagram bloknya dapat digambarkan :



Gambar 3.11. Diagram blok tegangan terminal

3.2.3.3. Diagram Blok Daya Elektrik [8]

Persamaan daya elektrik dapat dijelaskan sebagai berikut :

$$T_e = P_e$$

$$P_e = \text{Re} \{ V I^* \}$$

$$= \text{Re} \{ (V_d + j V_q) (I_d - j I_q) \}$$

$$= V_d I_d + V_q I_q \quad (3-11)$$

dengan,

$$\begin{aligned}\Delta T_e &= \Delta P_e = V_d \Delta I_d + I_d \Delta V_d + V_q \Delta I_q + I_q \Delta V_q \\ \Delta P_e &= (V_d - X'_d I_q) \Delta I_d + (V_q + X_q I_d) \Delta I_q + I_q \Delta E'_q\end{aligned}\quad (3-12)$$

Dengan memasukkan persamaan arus ke dalam persamaan dasar 3-11 akan diperoleh :

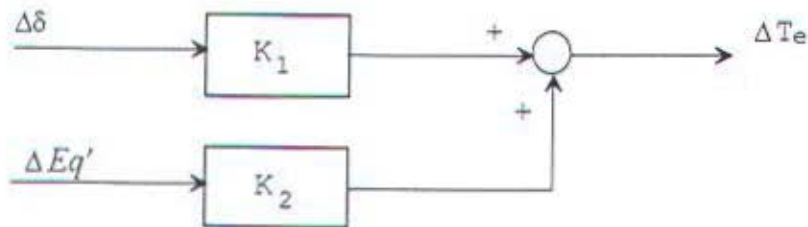
$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q \quad (3-13)$$

dengan,

K_1 : gain sensitifitas torsi elektrik mesin terhadap perubahan sudut rotor.

K_2 : gain sensitifitas torsi elektrik mesin terhadap perubahan *flux linkage*.

blok diagram persamaan torsi elektrik dapat digambarkan seperti di bawah ini :



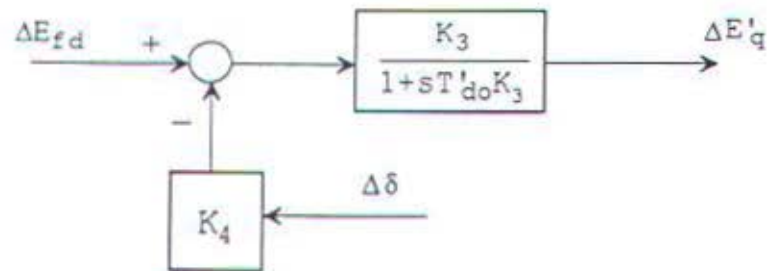
Gambar 3.12. Diagram blok torsi elektrik

3.2.3.4. Diagram Blok Persamaan Medan [8]

Dengan mendefinisikan K_3 adalah gain yang menyatakan sensitifitas flux linkage terhadap perubahan tegangan medan mesin, diperoleh persamaan medan :

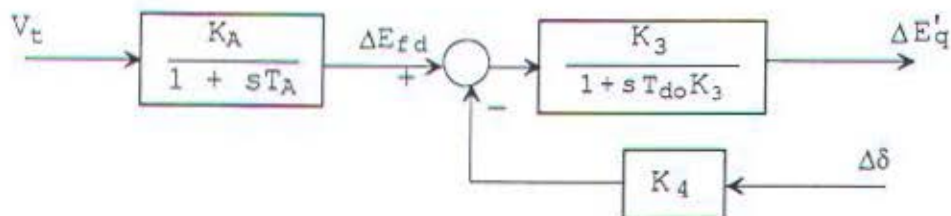
$$\Delta E'_q = \frac{K_3}{1 + s T'_{do} K_3} (\Delta E_{fd} - K_4 \Delta \delta) \quad (3-14)$$

dan diagram bloknya dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 3.13. Diagram blok tegangan peralihan mesin sinkron

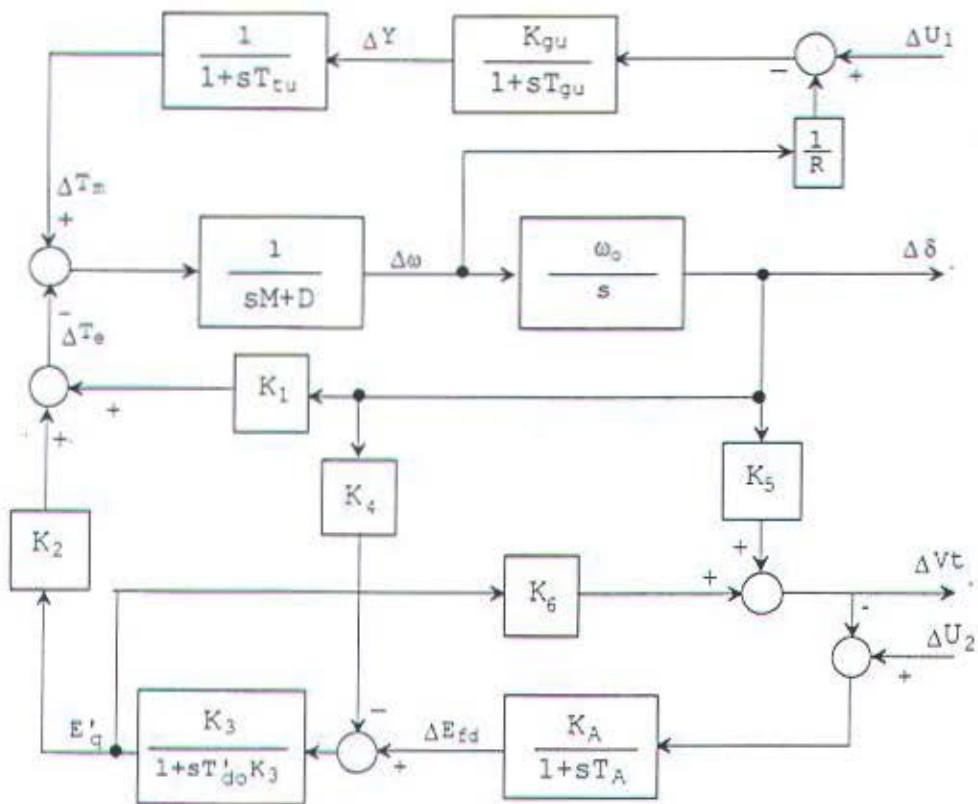
ΔE_{fd} (dynamic equivalent field voltage) adalah keluaran dari sistem eksitasi, maka dengan menggunakan model eksiter yang telah diturunkan di bagian depan, maka dari diagram blok di atas dapat digambarkan diagram blok untuk regulator tegangan dan sistem eksitasi sebagai berikut :



Gambar 3.14. Diagram blok sistem eksitasi dan regulator tegangan

3.2.4. Model Linier Mesin Tunggal PLTU Gresik

Dari blok diagram yang dibahas di atas dapat disusun model linier mesin tunggal keseluruhan sebagai berikut :



Gambar 3.15. Diagram lengkap model mesin tunggal dengan turbin uap

Dari pemodelan di atas, kemudian dapat disusun persamaan-persamaan keadaan sistem mesin tunggal yang terhubung dengan infinit bus, dengan susunan variabel keadaan untuk sistem keseluruhan adalah : ΔY sebagai perubahan level katup, ΔT_m sebagai perubahan torsi mekanik, $\Delta \delta$ sebagai perubahan sudut rotor, $\Delta \omega$ sebagai perubahan kecepatan sudut, $\Delta E'_q$ sebagai perubahan tegangan generator, ΔE_{fd} sebagai perubahan tegangan medan. Variabel masukan untuk mesin terdiri dari dua masukan yaitu sinyal masukan ΔU_1 diumpankan ke sisi turbin

dan sinyal masukan ΔU_2 diumpankan ke sisi eksitasi. Variabel keluaran berupa ΔY , ΔT_m , ΔP_e (perubahan daya listrik), $\Delta \omega$, ΔV_t (perubahan tegangan terminal), ΔE_{fd} .

3.3. PERSAMAAN KEADAAN DAN PERSAMAAN OUTPUT

Dari blok Gambar 3.15 di atas dapat disusun persamaan-persamaan keadaan sistem mesin tunggal yang terhubung dengan bus infinit sebagai berikut:

$$\dot{x}(t) = A x(t) + B U(t) \quad (3-15)$$

$$y(t) = C x(t) \quad (3-16)$$

Bentuk umum persamaan matrik keadaan sistem dapat ditulis sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\Delta Y} \\ \dot{\Delta T_m} \\ \dot{\Delta \delta} \\ \dot{\Delta \omega} \\ \dot{\Delta E'_q} \\ \dot{\Delta E_{fd}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{16} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{61} & \dots & \dots & a_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Y \\ \Delta T_m \\ \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ \dots & \dots \\ b_{61} & b_{62} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \end{bmatrix}$$

3.3.1. Komponen Matriks A

Persamaan keadaan untuk mencari nilai matriks A (matriks variabel keadaan) dapat diturunkan sebagai berikut (dengan asumsi $\Delta U = 0$) :

$$1). \quad \Delta Y = -\frac{1}{R} \Delta \omega \frac{K_{gu}}{1 + s T_{gu}} = \frac{-K_{gu}}{R + R T_{gu} s} \Delta \omega$$

$$\Delta Y R + \Delta Y s R T_{gu} = -K_{gu} \Delta \omega$$

$$\begin{aligned}\dot{\Delta Y} R T_{gu} + \Delta Y R &= -K_{gu} \Delta \omega \\ \dot{\Delta Y} &= \frac{-1}{T_{gu}} \Delta Y + \frac{(-K_{gu})}{R T_{gu}} \Delta \omega\end{aligned}\quad (3-17)$$

$$\begin{aligned}2). \quad \Delta T_m &= \frac{1}{1 + sT_{tu}} \Delta Y \\ \Delta T_m (1 + sT_{tu}) &= \Delta Y \\ \Delta T_m + s\Delta T_m T_{tu} &= \Delta Y \\ \dot{\Delta T}_m &= \frac{1}{T_{tu}} \Delta Y - \frac{1}{T_{tu}} \Delta T_m\end{aligned}\quad (3-18)$$

$$\begin{aligned}3). \quad \Delta \delta &= \Delta \omega \frac{\omega_0}{s} \\ \Delta \delta s &= \omega_0 \Delta \omega \\ \dot{\Delta \delta} &= \omega_0 \Delta \omega\end{aligned}\quad (3-19)$$

$$\begin{aligned}4). \quad \Delta \omega &= (\Delta T_m - \Delta T_e) \frac{1}{sM + D} \\ \Delta \omega &= (-K_1 \Delta \delta - K_2 \Delta E'_q + \Delta T_m) \frac{1}{sM + D} \\ \Delta \omega s M + \Delta \omega D &= -K_1 \Delta \delta - K_2 \Delta E'_q + \Delta T_m \\ \dot{\Delta \omega} &= \frac{1}{M} \Delta T_m - \frac{K_1}{M} \Delta \delta - \frac{D}{M} \Delta \omega - \frac{K_2}{M} \Delta\end{aligned}\quad (3-20)$$

$$\begin{aligned}5). \quad \Delta E'_q &= (-K_4 \Delta \delta + \Delta E_{fd}) \frac{K_3}{1 + sT'_{do} K_3} \\ \Delta E'_q (1 + sT'_{do} K_3) &= -K_4 K_3 \Delta \delta + K_3 \Delta E_{fd} \\ \Delta E'_q + \Delta E'_q s T'_{do} K_3 &= -K_4 K_3 \Delta \delta + K_3 \Delta \\ \dot{\Delta E}'_q &= -\frac{K_4}{T'_{do}} \Delta \delta + \frac{1}{T'_{do}} \Delta E_{fd} - \frac{1}{K_3 T'_{do}} \Delta E'_q\end{aligned}\quad (3-21)$$

$$\begin{aligned}6). \quad \Delta E_{fd} &= \frac{K_A}{1 + sT_A} (-\Delta V_t) \\ \Delta E_{fd} (1 + sT_A) &= -K_A \Delta V_t \\ \Delta E_{fd} s T_A &= -K_A \Delta V_t\end{aligned}$$

$$\Delta \dot{E}_{fd} = -K_A(K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q) - \Delta E_{fd} \quad (3-22)$$

Dari rumus-rumus tersebut di atas, komponen matriks variabel keadaan [A] dapat dituliskan seperti di bawah ini, dengan matriks yang tidak tercantum berharga nol.

$$\begin{aligned} a(1,1) &= \frac{-1}{T_{gu}} & ; a(1,4) &= \frac{-K_{gu}}{R T_{gu}} & ; a(2,1) &= \frac{1}{T_{tu}} & ; a(2,2) &= \frac{1}{T_{tu}} ; \\ a(3,4) &= \omega_0 & ; a(4,2) &= \frac{1}{M} & ; a(4,3) &= \frac{-K_1}{M} & ; a(4,4) &= \frac{-D}{M} ; \\ a(4,5) &= \frac{-K_2}{M} & ; a(5,3) &= \frac{-K_4}{T'_{do}} & ; a(5,5) &= \frac{-1}{K_3 T'_{do}} & ; a(5,6) &= \frac{1}{T'_{do}} ; \\ a(6,3) &= -\frac{K_A K_5}{T_A} & ; a(6,5) &= -\frac{K_A K_6}{T_A} & ; a(6,6) &= \frac{1}{T_A} \end{aligned}$$

Dalam bentuk matriks :

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_{gu}} & 0 & 0 & \frac{-K_{gu}}{R T_{gu}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{tu}} & \frac{-1}{T_{tu}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{M} & \frac{-K_1}{M} & \frac{-D}{M} & \frac{-K_2}{M} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-K_4}{T'_{do}} & 0 & \frac{-1}{K_3 T'_{do}} & \frac{1}{T'_{do}} \\ 0 & 0 & \frac{-K_5 K_A}{T_A} & 0 & \frac{-K_6 K_A}{T_A} & \frac{1}{T_A} \end{bmatrix}$$

3.3.2. Komponen Matriks B

Untuk mencari matriks masukan yaitu dengan mencari persamaan keadaan, dengan menambahkan nilai ΔU , sehingga kita akan mendapatkan persamaan keadaan yang terdiri dari variabel keadaan yang sama dengan persamaan keadaan komponen matriks A ditambah dengan variabel kontrol (masukan). Konstanta variabel kontrol inilah yang kita buat matriks masukannya. Persamaan keadaan untuk mencari nilai matriks B (matriks variabel keadaan) dapat diturunkan sebagai berikut dengan mengikut sertakan variabel ΔU .

$$\begin{aligned}
 1). \quad \Delta Y &= \frac{K_{gu}}{1 + sT_{gu}} \left(\Delta U_1 - \frac{\Delta \omega}{R} \right) \\
 \Delta Y + s\Delta Y T_{gu} &= K_{gu} \Delta U_1 - \frac{K_{gu}}{R} \Delta \omega \\
 \Delta \dot{Y} &= \frac{K_{gu}}{T_{gu}} \Delta U_1 - \frac{K_{gu}}{T_{gu}R} \Delta \omega - \frac{1}{T_{gu}} \Delta Y
 \end{aligned} \tag{3-23}$$

$$\begin{aligned}
 2). \quad \Delta E_{Fd} &= \left(\Delta U_2 - \Delta V_t \right) \frac{K_A}{1 + sT_A} \\
 \Delta E_{Fd} (1 + sT_A) &= K_A \Delta U_2 - K_A K_5 \Delta \delta - K_6 K_A \Delta E'_q \\
 \Delta \dot{E}_{Fd} &= \frac{K_A}{T_A} \Delta U_2 - \frac{K_5 K_A}{T_A} \Delta \delta - \frac{K_6 K_A}{T_A} \Delta E'_q - \frac{1}{T_A} \Delta E_{Fd}
 \end{aligned} \tag{3-24}$$

Persamaan di atas sama dengan persamaan untuk mencari komponen matriks A (untuk variabel ΔY dan ΔE_{Fd}) dengan tambahan variabel ΔU . Sehingga nilai komponen matriks masukan (matriks B) dapat dituliskan sebagai berikut :

$$b(1, 1) = \frac{K_{gu}}{T_{gu}} ; \quad b(2, 1) = 0 ; \quad b(3, 1) = 0 ; \quad b(4, 1) = 0 ; \quad b(5, 1) = 0 ; \quad b(6, 1) = 0$$

$$b(1, 2) = 0 ; \quad b(3, 2) = 0 ; \quad b(4, 2) = 0 ; \quad b(5, 2) = 0 ; \quad b(6, 2) = \frac{K_A}{T_A}$$

Dalam bentuk matriks :

$$B = \begin{bmatrix} \frac{K_{gu}}{T_{gu}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_A}{T_A} \end{bmatrix}$$

3.3.3. Komponen Matriks C

Pada variabel keluaran, variabel-variabel sudut rotor dan tegangan peralihan diganti dengan variabel daya listrik dan tegangan terminal generator, karena variabel tersebut sulit untuk diukur. Persamaan keadaan untuk mencari nilai matriks C dapat diturunkan sebagai berikut :

$$1). \Delta Y = \Delta Y \quad (3-25)$$

$$2). \Delta T_m = \Delta T_m \quad (3-26)$$

$$3). \Delta P_e = \Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q \quad (3-27)$$

$$4). \Delta \omega = \Delta \omega \quad (3-28)$$

$$5). \Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q \quad (3-29)$$

$$6). \Delta E_{fd} = \Delta E_{fd} \quad (3-30)$$

Bentuk umum persamaan matriks pengukuran :

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta Y \\ \Delta T_m \\ \Delta P_e \\ \Delta \omega \\ \Delta V_t \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & \dots & \dots & c_{16} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{61} & \dots & \dots & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Y \\ \Delta T_m \\ \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix}$$

sehingga komponen matriks C dapat dituliskan seperti di bawah ini, dengan matriks yang tidak tercantum berharga nol.

$$c(1, 1) = 1 \quad ; c(2, 2) = 1 \quad ; c(3, 3) = K_1 \quad ; c(3, 5) = K_2 \quad ; c(4, 4) = 1 \quad ; c(5, 3) = K_5$$

$$c(5, 5) = K_6 \quad ; c(6, 6) = 1$$

dalam bentuk matriks :

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_1 & 0 & K_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_5 & 0 & K_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

BAB IV

STUDI SIMULASI DAN ANALISIS

4.1. ALGORITMA

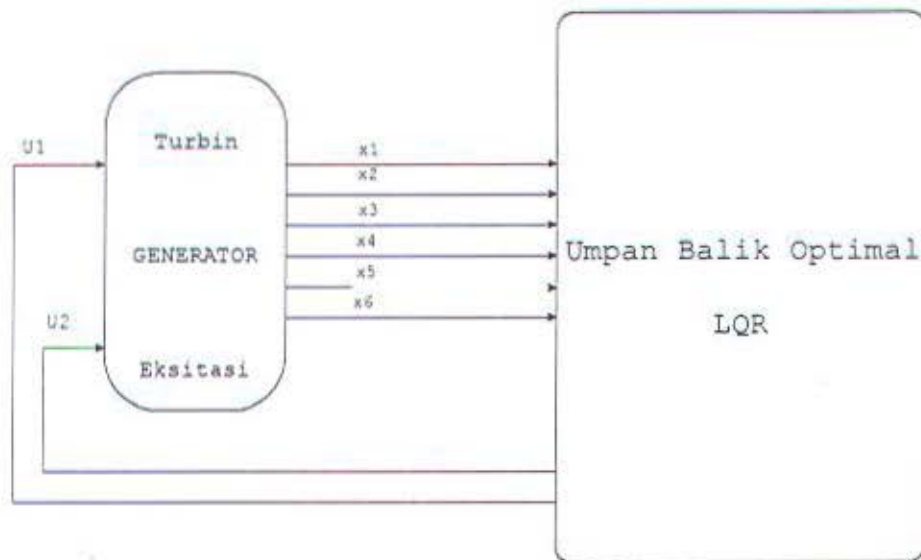
Berdasarkan pembahasan pada bab-bab sebelumnya, maka dalam studi simulasi ini dilakukan beberapa tahapan penyelesaian. Tahap pertama yaitu membentuk model sistem tenaga listrik mesin tunggal dan menentukan besaran-besaran yang diperlukan dalam perhitungan simulasi sistem antara lain besaran R , w_0 , K_{gu} , T_{gu} , M , D , T_A , K_A dan besaran lain yang berhubungan dengan matriks ruang keadaan.

Tahap kedua yaitu pencarian data yang berhubungan dengan sistem tenaga listrik tersebut kemudian menghitung parameter-parameter yang ditentukan antara lain parameter K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5 , K_6 dan besaran gangguan sebagai pendekatan terhadap gangguan yang terjadi.

Tahap ketiga yaitu menerapkan simulasi umpan balik menggunakan indeks kinerja kuadratis (*Linear Quadratic Regulator*) pada sistem mesin tunggal seperti Gambar 4.1. Pembangkit mengirimkan enam sinyal informasi ke umpan balik optimal LQR, dan kemudian setelah diproses umpan balik optimal LQR mengembalikan dua sinyal kontrol ke pembangkit yaitu melalui sisi turbin dan eksitasi.

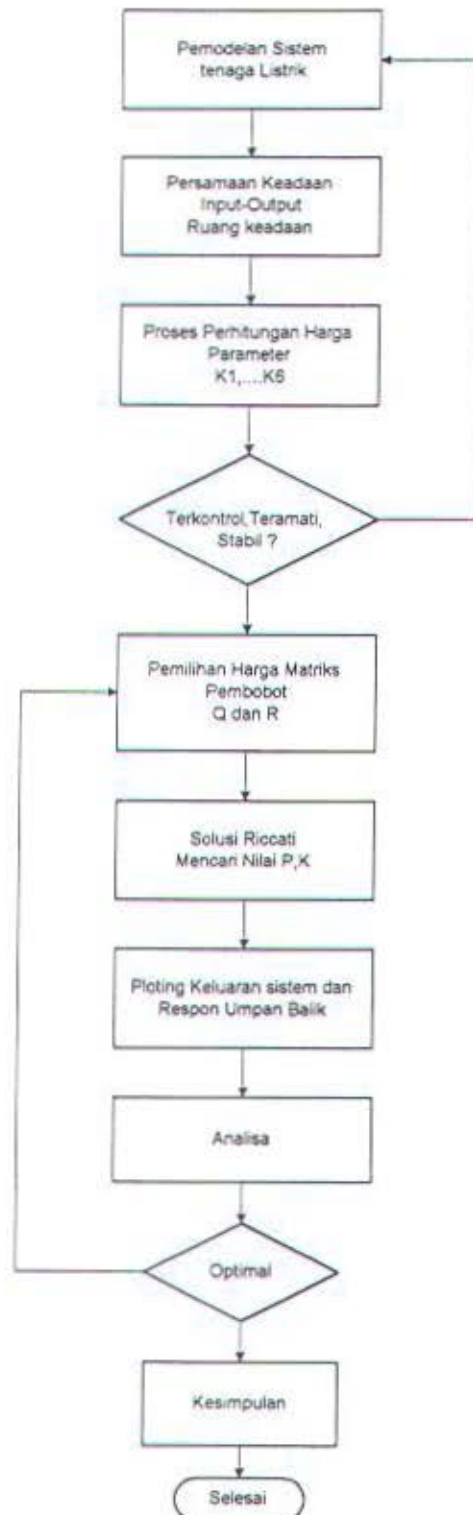
Tahap keempat yaitu menguji metode-metode pemilihan matriks pembobot sesuai penjelasan pada Bab II, kemudian membandingkannya. Tujuan

membandingkan ini adalah untuk mengetahui pengaruh nilai matriks pembobot terhadap kinerja sistem dan mendapatkan metode yang paling baik dalam memilih matriks pembobot dengan respon umpan balik dan respon waktu keluaran sistem yang optimal.



Gambar 4.1. Penerapan sistem umpan balik LQR pada sistem tenaga listrik mesin tunggal melalui sisi turbin dan eksitasi

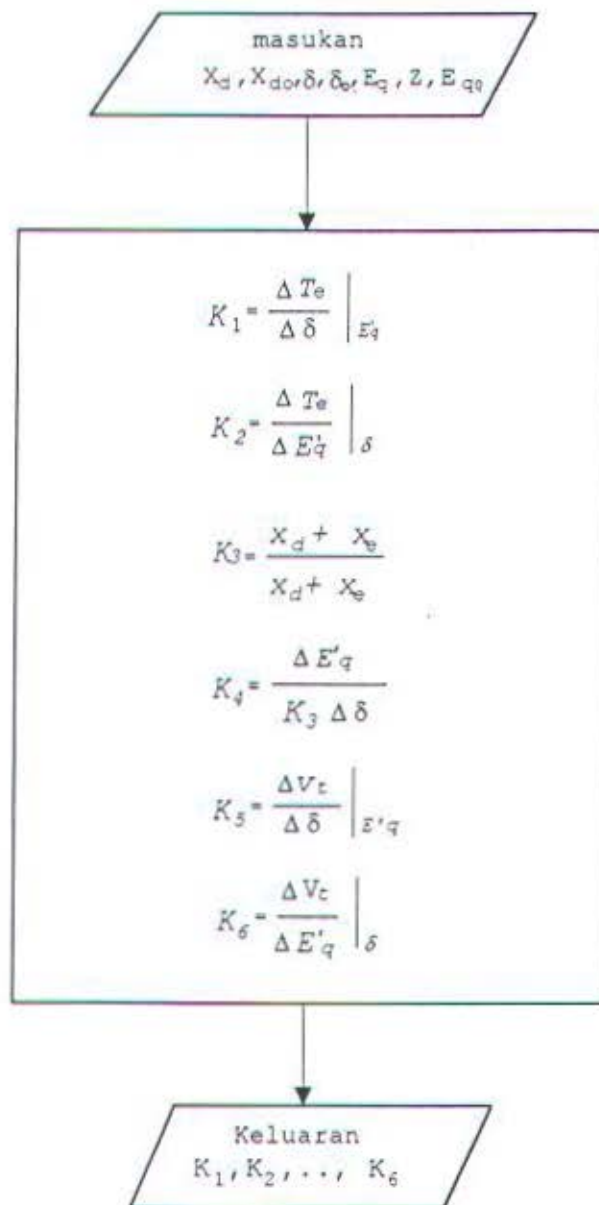
Bila terjadi gangguan perubahan beban (gangguan dinamik), akan terjadi perubahan daya, tegangan dan frekuensi di generator. Untuk mencegah penyimpangan frekuensi akibat perubahan beban tersebut, agar secepat mungkin mencapai keadaan yang stabil, maka diperlukan pengendalian frekuensi dan tegangan pada generator, yaitu dengan memberikan input pada sisi turbin (perubah kecepatan) dan eksitasi. Perubahan posisi perubah kecepatan dan eksitasi dapat menghasilkan perubahan daya generator untuk mengatasi perubahan beban, melalui perubahan variabel-variabel yang telah dijelaskan pada Bab III.



Gambar 4.2. Algoritma Penyelesaian

4.2. PERHITUNGAN PARAMETER SISTEM

Di dalam jaringan mesin tunggal terdapat parameter yang sudah tetap dan juga yang muncul karena kondisi sistem. Di sini akan disajikan proses perhitungan parameter K_1 sampai K_6 yang terjadi akibat kondisi sistem.



Gambar 4.3. Perhitungan parameter mesin tunggal [11]

4.3. DATA [7,11,17]

Data ini merupakan harga-harga parameter generator dan turbin unit 1 PLTU Gresik dan keadaan pembebanan sistem yang dipakai dalam simulasi ini.

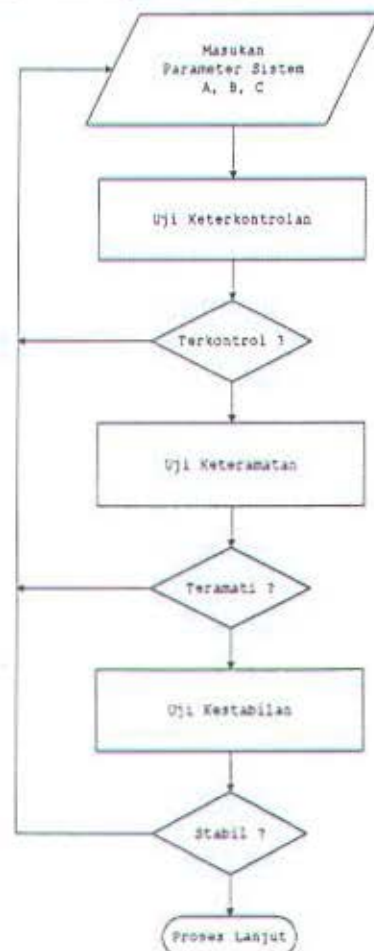
Tabel 4.1. Data parameter sistem dan kondisi beban pada bus infinit

DATA PARAMETER GENERATOR DAN TURBIN UNIT I	
P base	100 MVA
Tegangan Base	150 kV
Ra (tahanan jangkar)	0
M (konstanta Inersia)	3.5
Xl (reaktansi bocor)	0.05
x_d	1.81 atau 1.66 (pu)
x_d'	0.308 (pu)
x_q	1.5 (pu)
x_q'	0.471 (pu)
T_{do}'	6.2 (pu)
Faktor Peredaman Mekanis (D)	1.97
Gain Penguatan Eksitasi (K_A)	300
Gain Governor Uap (K_{gu})	20
Konstanta Waktu Penguatan Eksitasi (T_A)	0.05
Konstanta Waktu Governor Uap (T_{gu})	1
Konstanta Waktu Turbin Uap (T_{tu})	0.1
Konstanta Pengatur kecepatan (R)	0.52
Tegangan bus infinit	0.964 pu
Tegangan bus terminal	1 pu
Resistansi Saluran (R_e)	0.027 pu
Reaktansi Saluran (X_e)	0.0158 pu
Daya beban puncak	535 MVA
$\cos \theta$	0.85

4.4. PENERAPAN UMPAN BALIK OPTIMAL LQR

4.4.1. Pengujian Nilai Parameter Sistem

Sebelum proses perhitungan harga K dimulai dengan pengecekan sistem yang terdiri dari keterkontrolan, keteramatan dan kestabilan. Kalau ketiga syarat tersebut dipenuhi, maka proses selanjutnya baru dapat dilakukan yaitu mencari harga K sesuai dengan yang telah dijelaskan pada bab terdahulu.

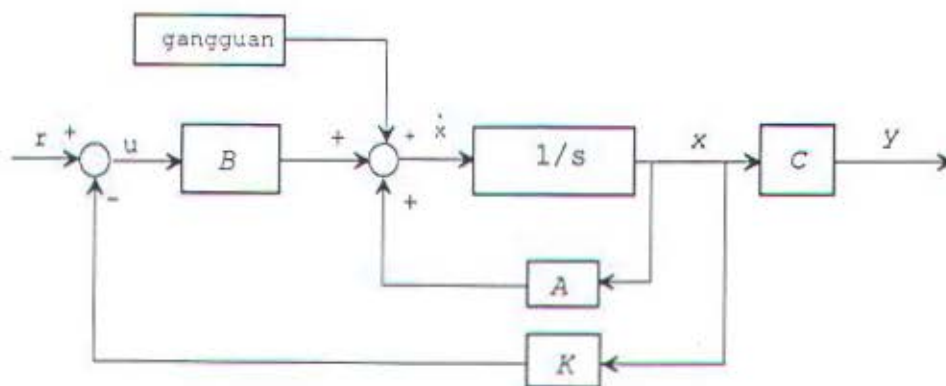


Gambar 4.4. Algoritma pengujian parameter sistem

4.4.2. Simulasi Sistem Dengan Gangguan

Setelah proses rancangan selesai dilakukan, kemudian dilakukan simulasi sistem yaitu sistem lingkaran terbuka dan sistem lingkaran tertutup (dengan umpan balik optimal). Tujuan simulasi terutama untuk mengetahui pengaruh pemilihan matriks pembobot Q dan R pada umpan balik optimal LQR dengan melihat respon waktu keluaran sistem dalam mengatasi gangguan menuju kondisi mantap.

Simulasi sistem loop terbuka dilakukan dengan melakukan pengujian terhadap sistem tersebut, dengan memberi sinyal uji masukan (fungsi tangga satuan). Untuk mengondisikan terhadap gangguan yang bersifat kecil dan mendekati saat gangguan yang sebenarnya, maka parameter-parameter yang mencerminkan perubahan beban bertindak sebagai gangguan yaitu sekitar 5 % dari beban nominal generator.



Gambar 4.5. Simulasi sistem terhadap gangguan

Penggunaan sinyal uji pada simulasi ini dapat dibenarkan karena adanya suatu korelasi antara karakteristik sistem terhadap sinyal masukan tertentu. Dari sinyal uji yang dikenakan terhadap suatu sistem, maka respon keluaran sistem dapat diketahui.

Pada saat terjadinya gangguan maka terjadi perubahan dalam diagram blok, dengan masukan berasal dari sinyal uji dan gangguan sehingga persamaan ruang keadaan sebagai berikut :

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t) \quad (4.1)$$

menjadi persamaan :

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t) + \mathbf{B}_g\mathbf{V}(t) \quad (4.2)$$

Untuk menyesuaikan persamaan (4.1) menjadi persamaan (4.2) bila gangguan dianggap fungsi satuan tangga dan deterministik, maka saat keadaan pulih (∞) adalah:

1. Gangguan $\mathbf{V}(t)$ merupakan suatu konstanta, maka perubahan ketinggian

katub turbin uap menjadi :

$$\Delta Y = \Delta V(1 + sT_{tu})$$

$$\Delta Y = \Delta V + \Delta \dot{V} T_{tu}$$

2. $\Delta T_m = \Delta V$
3. $\Delta \delta = 0$
4. $\Delta \omega = 0$
5. $\Delta E'_q = \Delta V/K_2$
6. $\Delta E_{FD} K_3/(sT_{d0}K_3+1) = \Delta V$

Maka variabel keadaan saat pulih tercapai terhadap gangguan $V(t)$ dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$x_{ss} = W V(t) \quad (4.3)$$

dengan

$$W^T = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1/K_2 \ 1/K_2 K_3]$$

Pada saat keadaan pulih tercapai maka $\dot{x}(t) = 0$, sedangkan matriks parameter keadaan sistem A susunannya tetap pada saat tidak dikenai gangguan, maka persamaan (4.3) berubah menjadi persamaan :

$$0 = A x_{ss} + B U_{ss} + B_g V(t) \quad (4.4)$$

dari persamaan-persamaan di atas maka didapat persamaan baru yaitu :

$$U_{ss} = -(B^T B)^{-1} B^T (A W + B_g) V(t) \quad (4.5)$$

Dengan mendefinisikan :

$$\underline{x}(t) = x(t) - x_{ss} \quad (4.6)$$

dan

$$\underline{u}(t) = U(t) - U_{ss} \quad (4.7)$$

dan $\underline{\dot{x}}(t) = \dot{x}(t) = \dot{x}(t)$ maka diperoleh :

$$\dot{\underline{x}}(t) = A \underline{x}(t) + B \underline{u}(t) \quad (4.8)$$

Persamaan (4.8) ini mempunyai bentuk seperti persamaan (4.1) yang berarti sistem dengan gangguan perubahan beban $V(t)$ dapat dirancang dengan persamaan indeks kinerja :

$$J = \int_0^\infty \{ \underline{x}^T(t) Q \underline{x}(t) + \underline{u}^T R \underline{u}(t) \} dt \quad (4.9)$$

variabel masukan optimal :

$$\underline{U}^*(t) = -K \underline{x}(t) \quad (4.10)$$

Dengan mensubstitusi persamaan-persamaan di atas diperoleh masukan optimal :

$$U^*(t) = -K x(t) + \underline{K} V(t) \quad (4.11)$$

dengan

$$\underline{K} = K^T W - (B^T B)^{-1} B^T (A W + B g) \quad (4.12)$$

Persamaan sistem lingkaran tertutup dengan gangguan diperoleh melalui substitusi persamaan (4.11) ke dalam persamaan (4.2), maka sistem lingkaran tertutup dapat ditulis :

$$\dot{\underline{x}}(t) = A^* \underline{x}(t) + B g^* V(t) \quad (4.13)$$

dengan :

$$A^* = A - B K$$

$$B g^* = B g + B K$$

Sedangkan untuk persamaan sistem lingkaran terbuka analisa dinamika sistem terhadap gangguan $V(t)$, dilakukan dengan mencari respon sistem lingkaran tertutup persamaan (4.13) dan sistem persamaan lingkaran terbuka :

$$\dot{\underline{x}}(t) = A \underline{x}(t) + B g V(t)$$

Matriks keadaan $B g$ penyusunannya yaitu dengan tidak mengaktifkan masukan U_1 dan U_2 sebagai berikut :

$$(\Delta T_m + V - \Delta T_e) = \Delta \omega (M s + D)$$

$$(\Delta T_m + V - \Delta \delta K_1 - K_2 E'_q) = \Delta \omega (M s + D)$$

$$(\Delta T_m + V - \Delta \delta K_1 - K_2 E'_q) = \Delta \omega M s + \Delta \omega D$$

$$(\Delta T_m + V - \Delta \delta K_1 - K_2 E'_q - \Delta \omega D) = \Delta \omega M s$$

$$\Delta \dot{\omega} = \frac{\Delta T_m}{M} + \frac{V}{M} - \frac{\Delta \delta K_1}{M} - \frac{K_2 E_q'}{M} - \frac{\Delta \omega D}{M} \quad (4.14)$$

Berdasarkan persamaan di atas maka diperoleh matriks parameter gangguan Bg sebagai berikut :

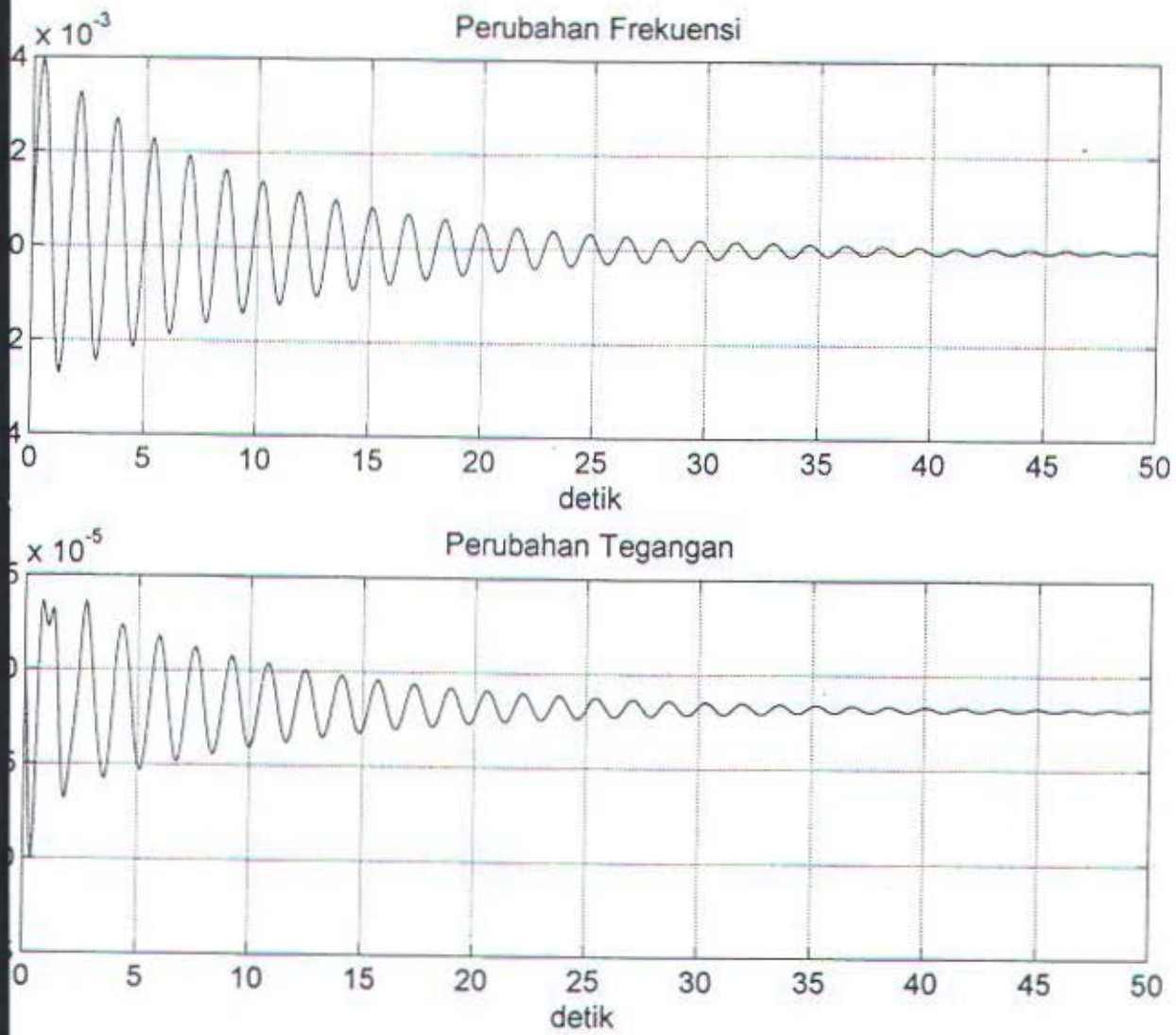
$$Bg = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/M \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Pemberian sinyal gangguan di sini meliputi perubahan beban di sekitar kestabilan dinamis, yaitu perubahan-perubahan beban yang berpengaruh kecil terhadap kestabilan. Perubahan-perubahan kecil tersebut dapat merupakan penambahan dan pengurangan beban. Untuk gangguan sebesar 5 % dari daya total maka matriks V(t) adalah :

$$V(t) = [0.05]$$

4.5. HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Simulasi yang dilakukan di sini dengan menggunakan batuan komputer digital dan *MATLAB for Windows 4.2c.1* untuk menentukan umpan balik optimal. Untuk mengetahui tingkat keandalan terbaik saat diberi umpan balik dengan indeks kinerja *Linear Quadratic Regulator*, maka penerapannya disimulasikan meliputi perbandingan metode pemilihan matriks pembobot sebagai alternatif perbaikan kinerja sistem dengan umpan balik K yang diterapkan pada sisi turbin dan eksitasi, dengan perubahan beban dinamik sebesar 5 %. Simulasi respon waktu keluaran sistem saat mengalami gangguan tanpa adanya umpan balik LQR sebagai berikut :



Gambar 4.6. Grafik keluaran sistem loop terbuka

Dari grafik di atas didapatkan waktu dalam satuan detik menuju kestabilan mantap setelah adanya gangguan tanpa adanya umpan balik optimal adalah sebagai berikut :

Tabel 4.2. *Respon waktu sistem saat terjadinya gangguan menuju ke keadaan mantap dalam satuan detik*

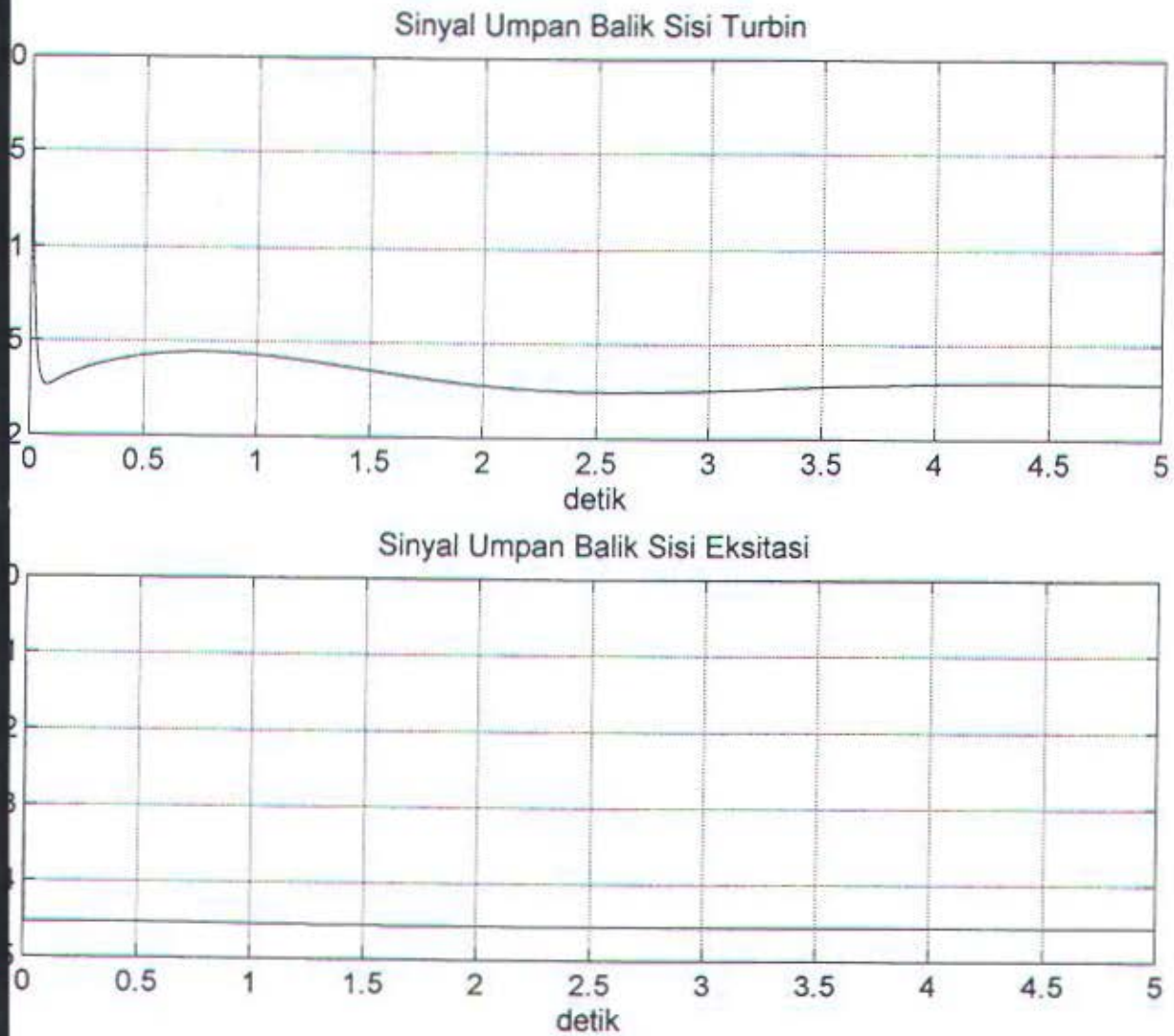
Frekuensi	Tegangan
50 detik	50 detik

Sedangkan simulasi pada sistem dengan umpan balik melalui sisi turbin dan sisi eksitasi dibedakan menjadi tiga, menurut cara pemilihan atau metode pencarian matriks pembobot yang diberikan pada umpan balik optimal LQR.

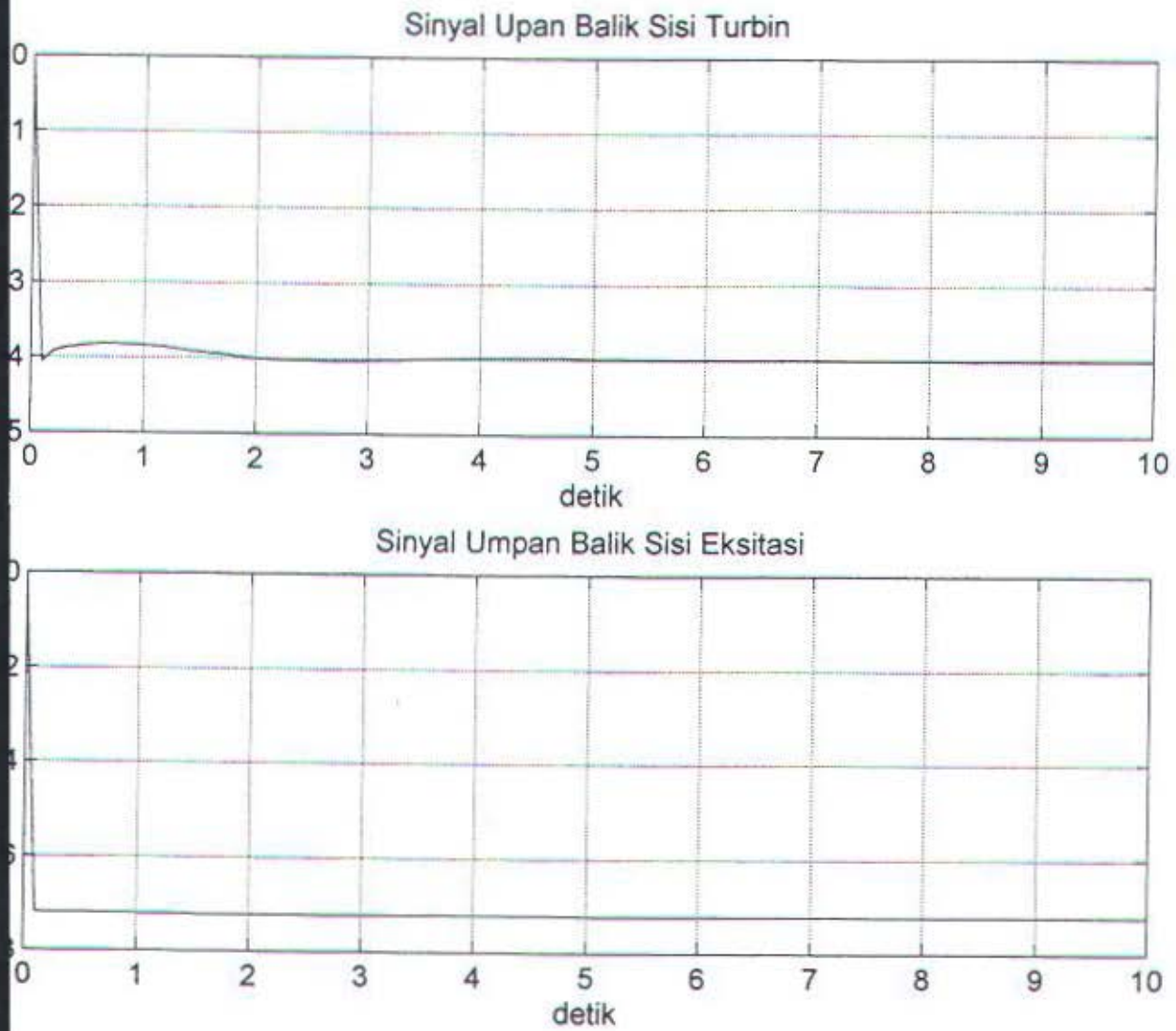
4.5.1. Simulasi Pada Metode *Trial-Error*

Metode ini adalah metode yang umum dan praktis dilakukan dalam penerapan kontrol umpan balik optimal LQR, yaitu memilih nilai Q dan R dengan cara mencoba-coba untuk menentukan keluaran sistem yang diinginkan relatif terhadap keluaran sistem sebelumnya (percobaan sebelumnya), sehingga waktu yang diperlukan sangat lama dan hasilnya belum tentu memuaskan.

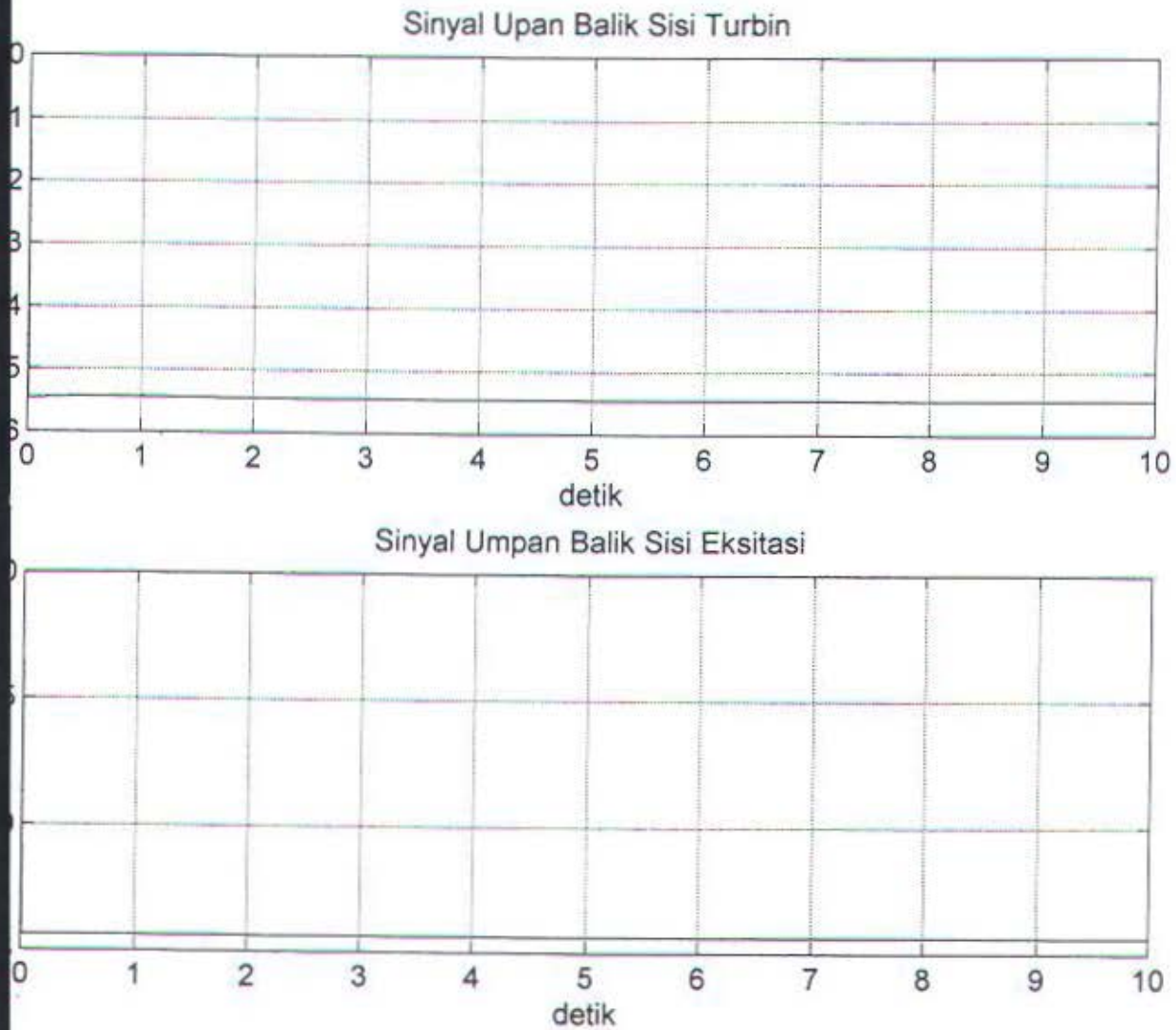
Simulasi ini dilakukan dengan mengulang nilai matriks Q dan R sebanyak 3 kali, nilai Q adalah *semi definit positif* dan R *definit positif*.



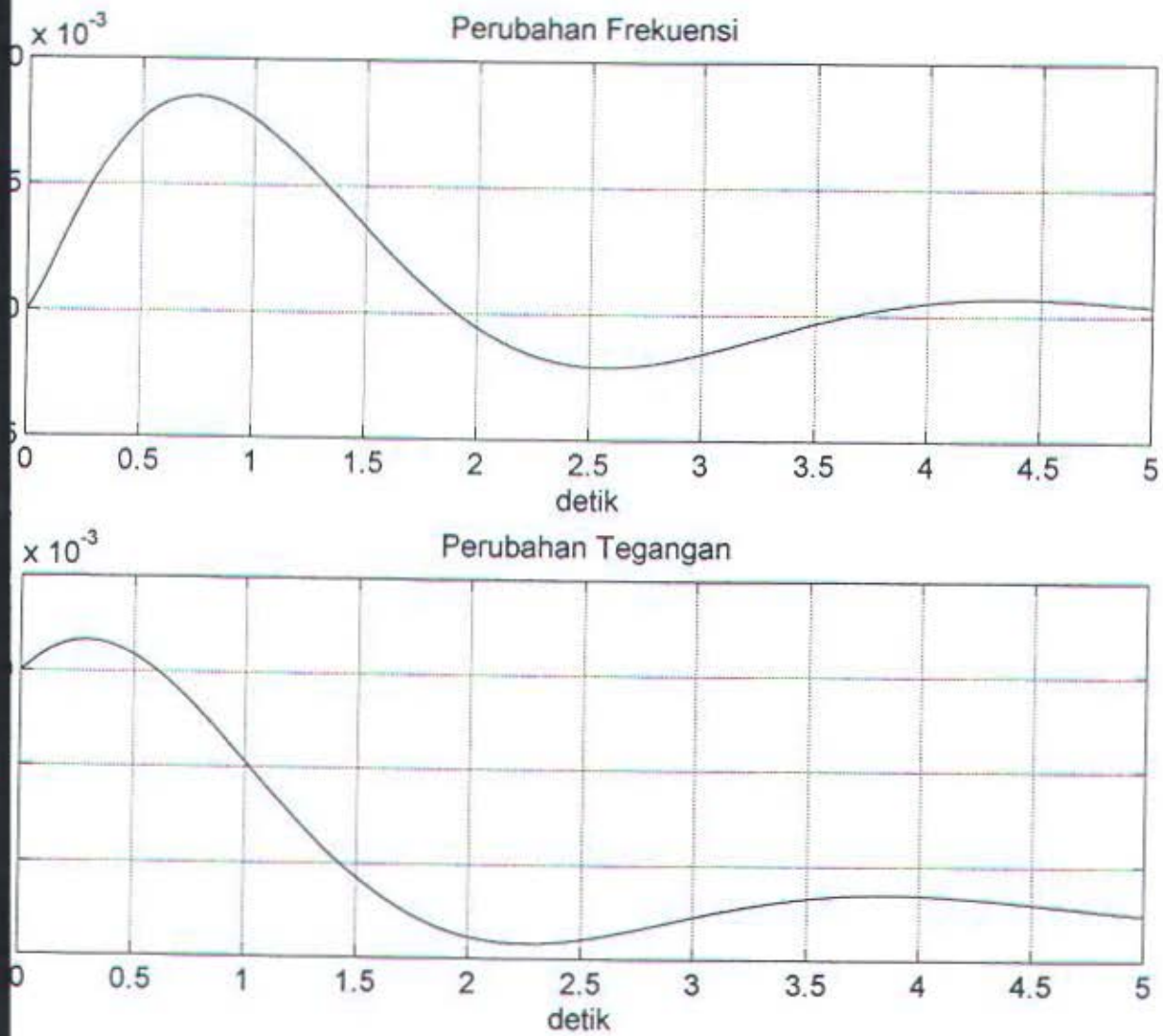
Gambar 4.7. Sinyal umpan balik pada percobaan pertama



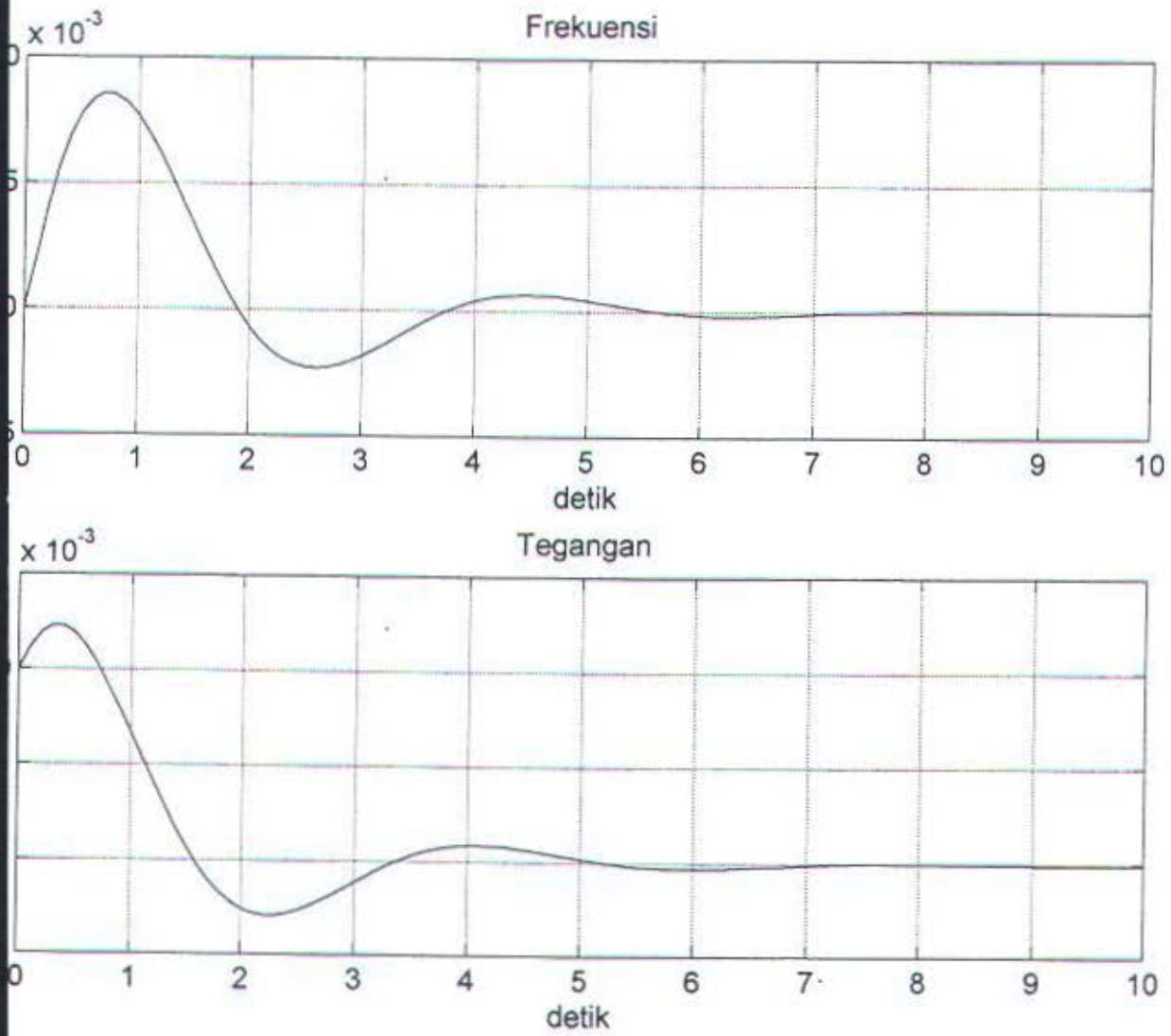
Gambar 4.8. Sinyal umpan balik pada percobaan kedua



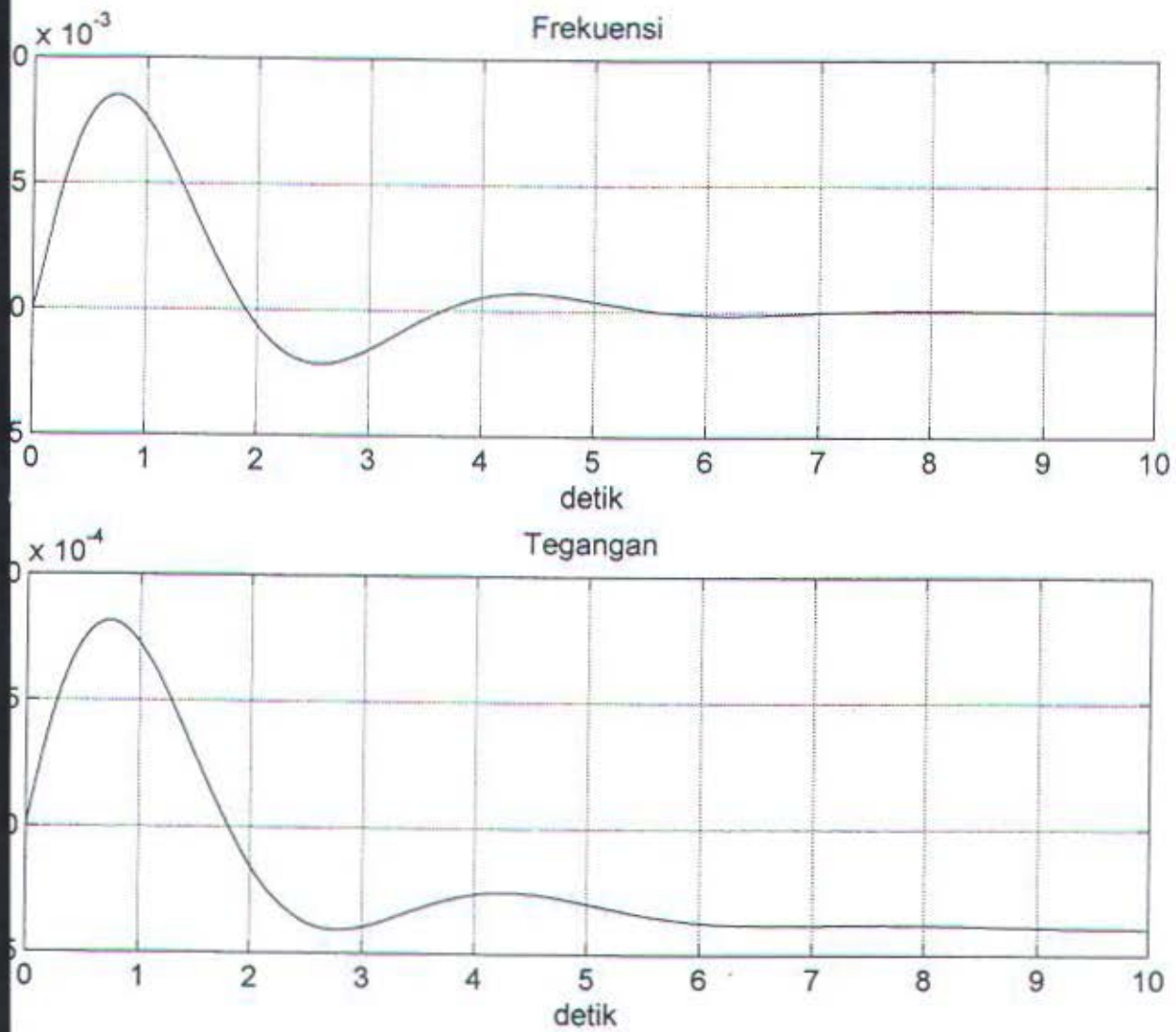
Gambar 4.9. Sinyal umpan balik pada percobaan ketiga



Gambar 4.10. Keluaran frekuensi dan tegangan untuk percobaan pertama



Gambar 4.11. Keluaran frekuensi dan tegangan untuk percobaan kedua



Gambar 4.12. Keluaran frekuensi dan tegangan untuk percobaan ketiga

Dari simulasi di atas waktu respon peredaman menuju kondisi mantap dalam satuan detik setelah adanya gangguan terhadap sistem dapat ditampilkan dalam tabel berikut :

Tabel 4.3. *Waktu peredaman menuju kondisi mantap dalam satuan detik setelah adanya gangguan dengan Q dan R secara coba-coba*

Percobaan	Frekuensi	Tegangan
1	5 detik	5 detik
2	8 detik	8 detik
3	9 detik	10 detik

(nilai matriks Q , R terlampir)

dari simulasi, respon redaman sistem yang paling cepat dalam mengeliminasi gangguan diperoleh dari percobaan 1. Pada kenyataannya akan terlalu sulit dan memerlukan waktu yang lama untuk memperoleh respon yang memuaskan dari pemberian nilai matriks pembobot menurut metode ini.

4.5.2. Simulasi Pada Metode Bryson

Dalam metode ini ditentukan dulu nilai awal Q_0 dan R_0 sebagai matriks pembobot dalam menyelesaikan solusi riccati untuk mencari deviasi maksimum respon umpan balik dan deviasi maksimum variabel keadaan sistem umpan balik ini. Untuk mendapatkan respon keluaran yang lebih memuaskan maka matriks Q dan R diperbaharui melalui formula Bryson, dari nilai variabel masukan akan diperoleh nilai Q yang diperbaharui dan dari nilai respon umpan balik diperoleh nilai untuk matriks R yang diperbaharui.

Adapun algoritmanya adalah sebagai berikut :

$$q_i = \frac{1}{[X_i(\text{maks})]^2} \quad \text{dengan } i = 1, \dots, 6$$

$$r_j = \frac{1}{[U_j(\text{maks})]} \quad \text{dengan } j = 1, 2$$

Nilai matriks Q dan R adalah diagonal sehingga :

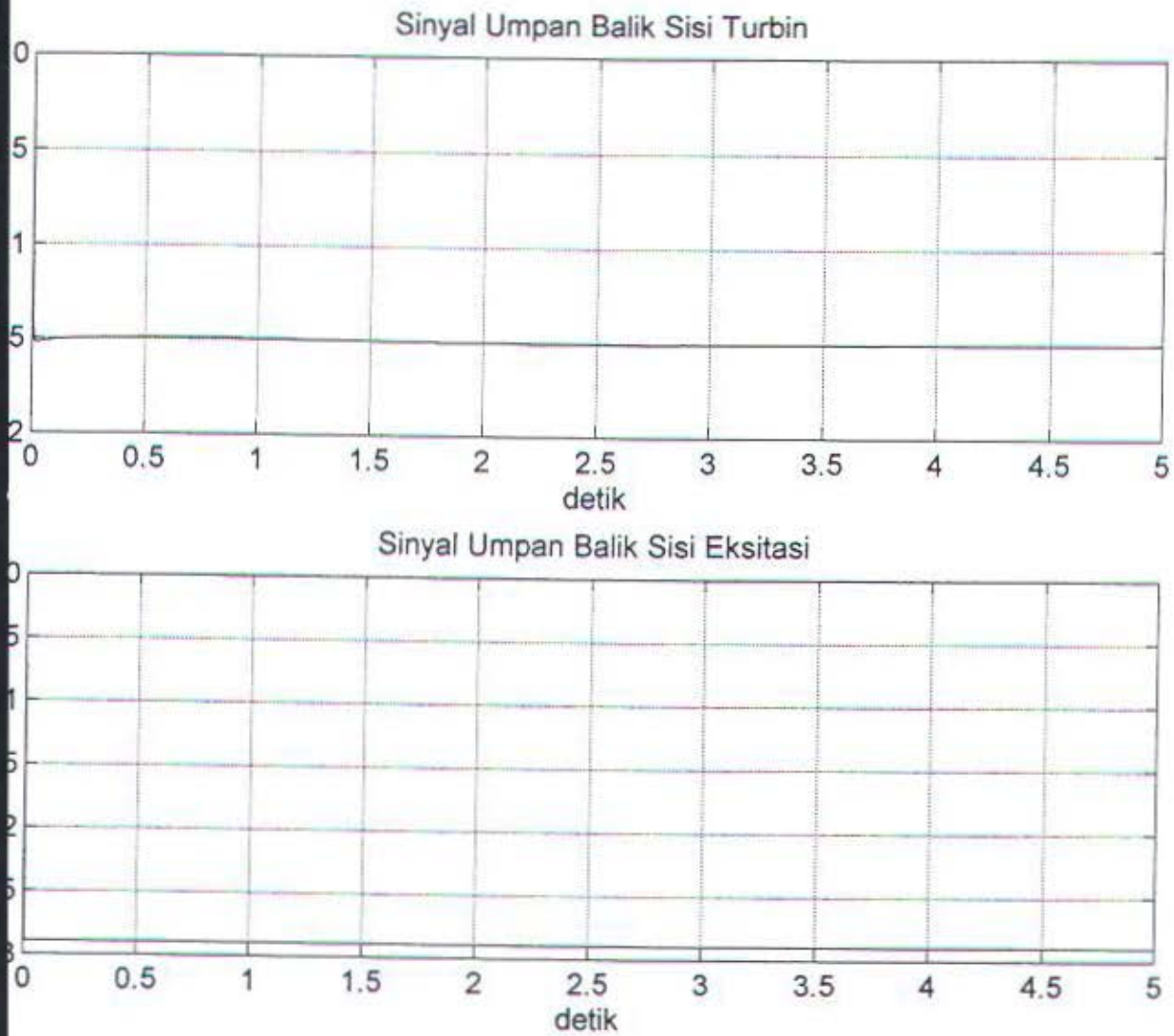
$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_6 \end{bmatrix}$$

dan

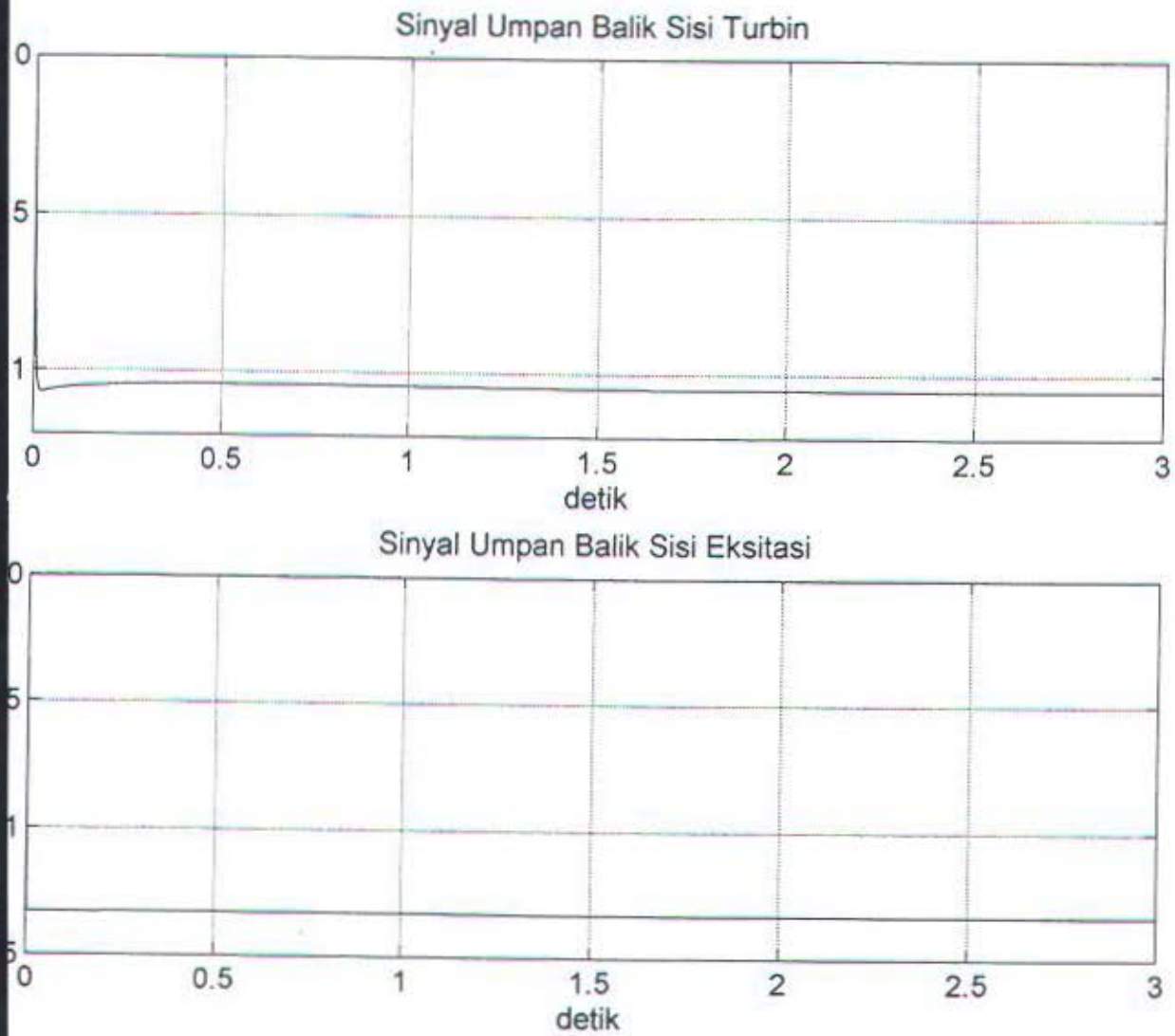
$$R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_2 \end{bmatrix}$$

Apabila respon yang diperoleh belum memuaskan maka dapat dilakukan pengulangan Q dan R sampai diperoleh respon dengan waktu menuju keadaan mantap yang minimal. Simulasi menggunakan *PC-MATLAB 4.2c.1* dan nilai awal matriks pembobot diberikan :

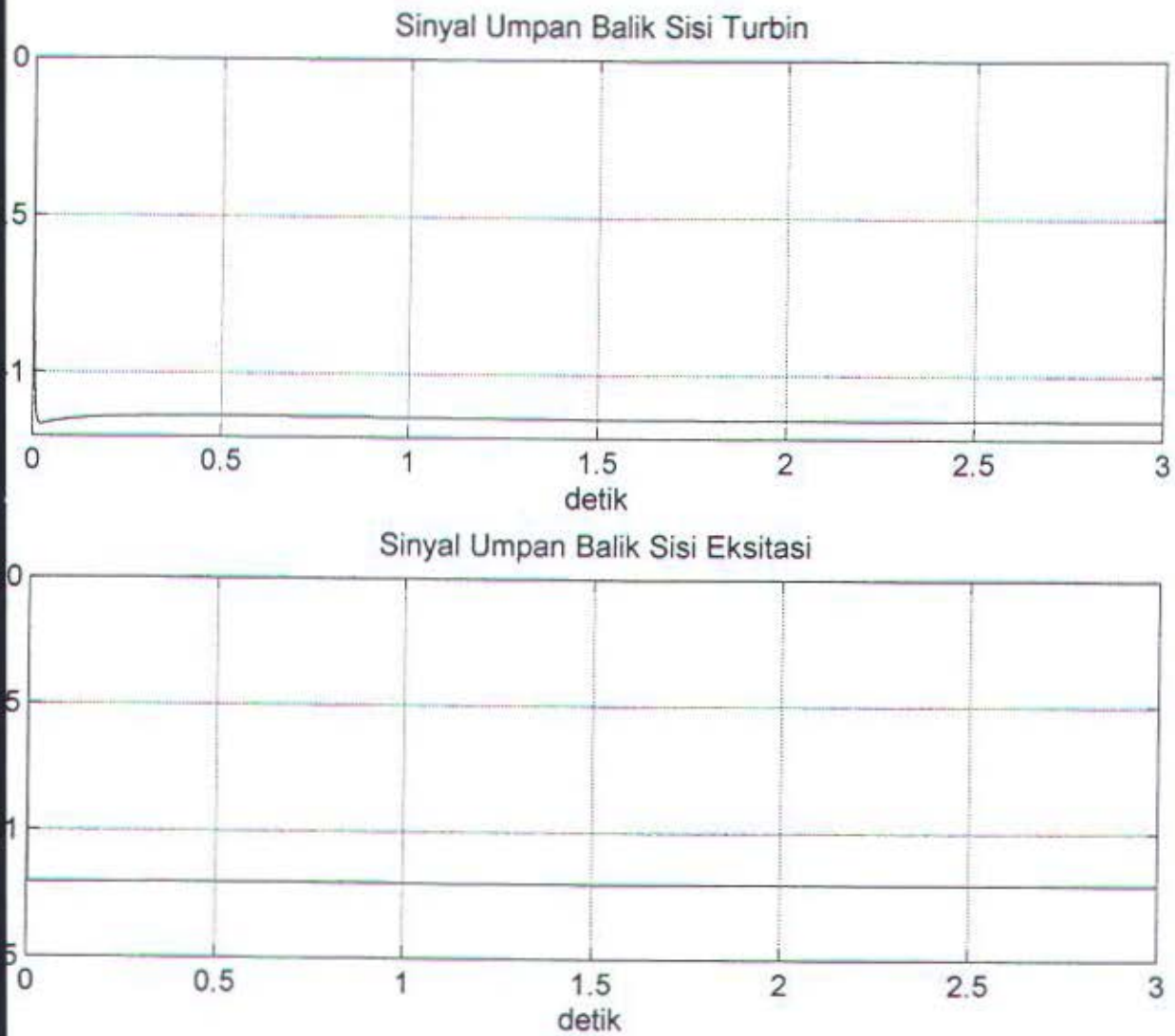
$$Q_0 = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix} \quad \text{dan} \quad R_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$



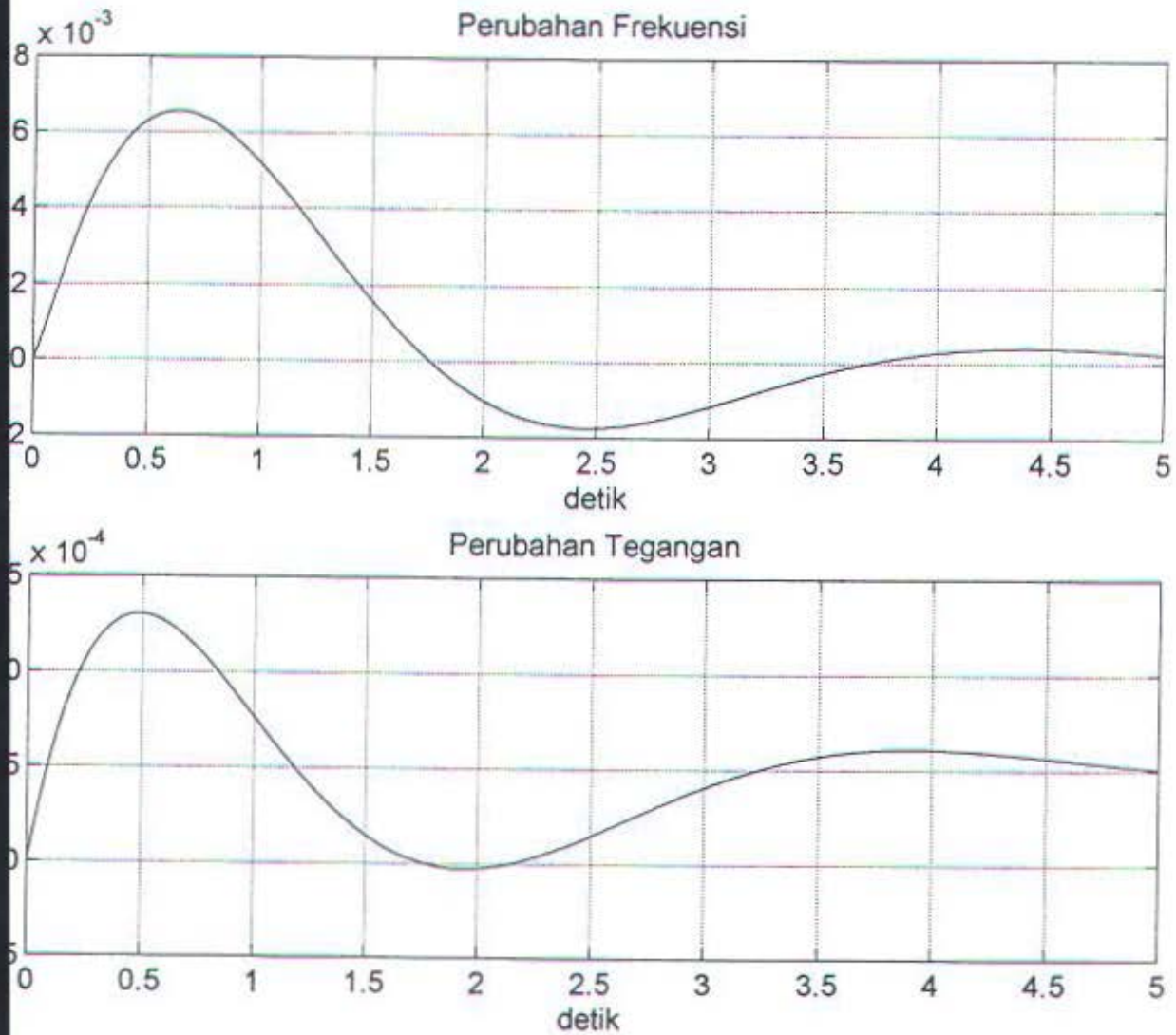
Gambar 4.13. Respon umpan balik pada sisi turbin dan eksitasi untuk Q_f dan R_f



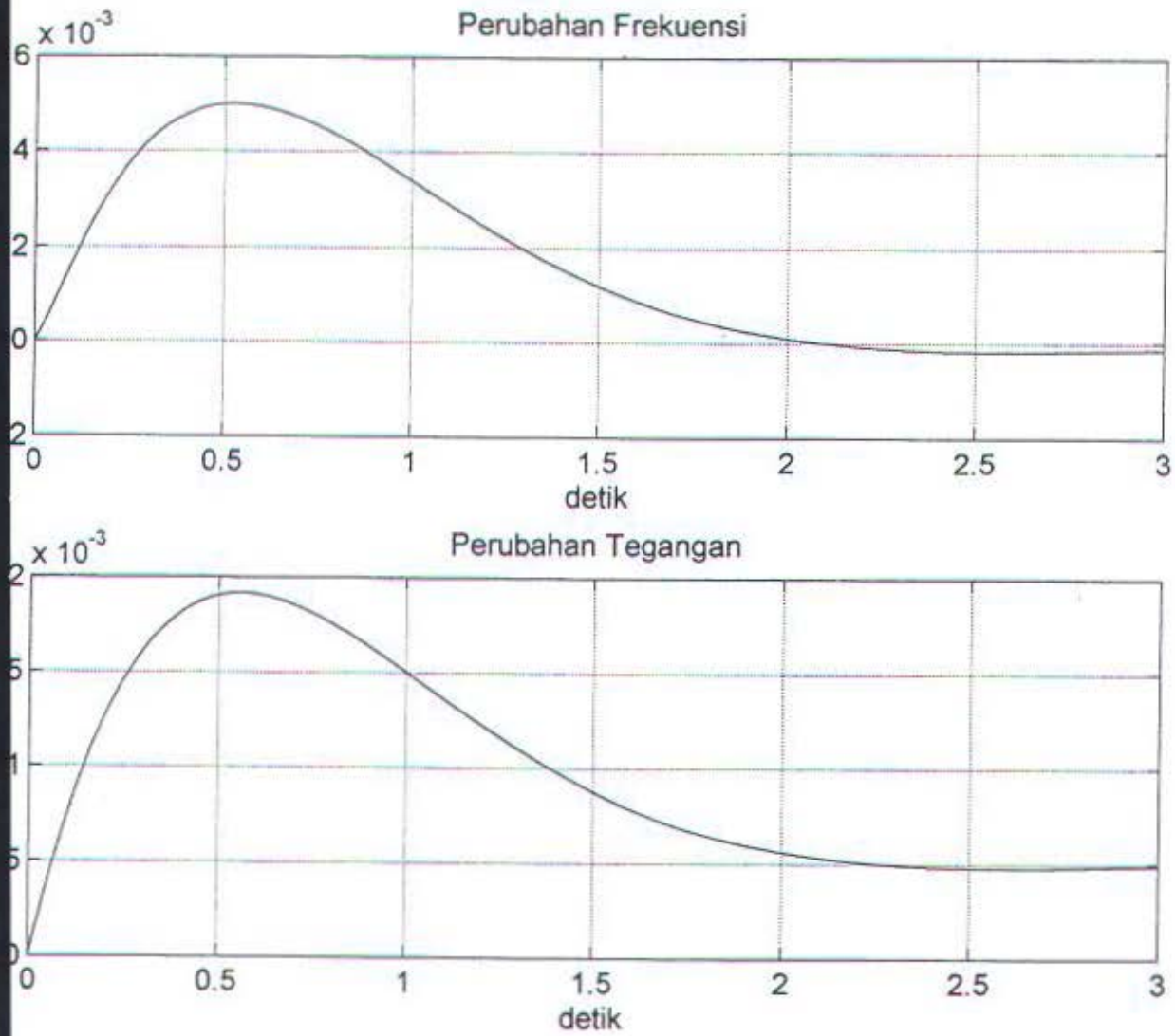
Gambar 4.14. Respon umpan balik pada sisi turbin dan eksitasi untuk Q_2 dan R_2



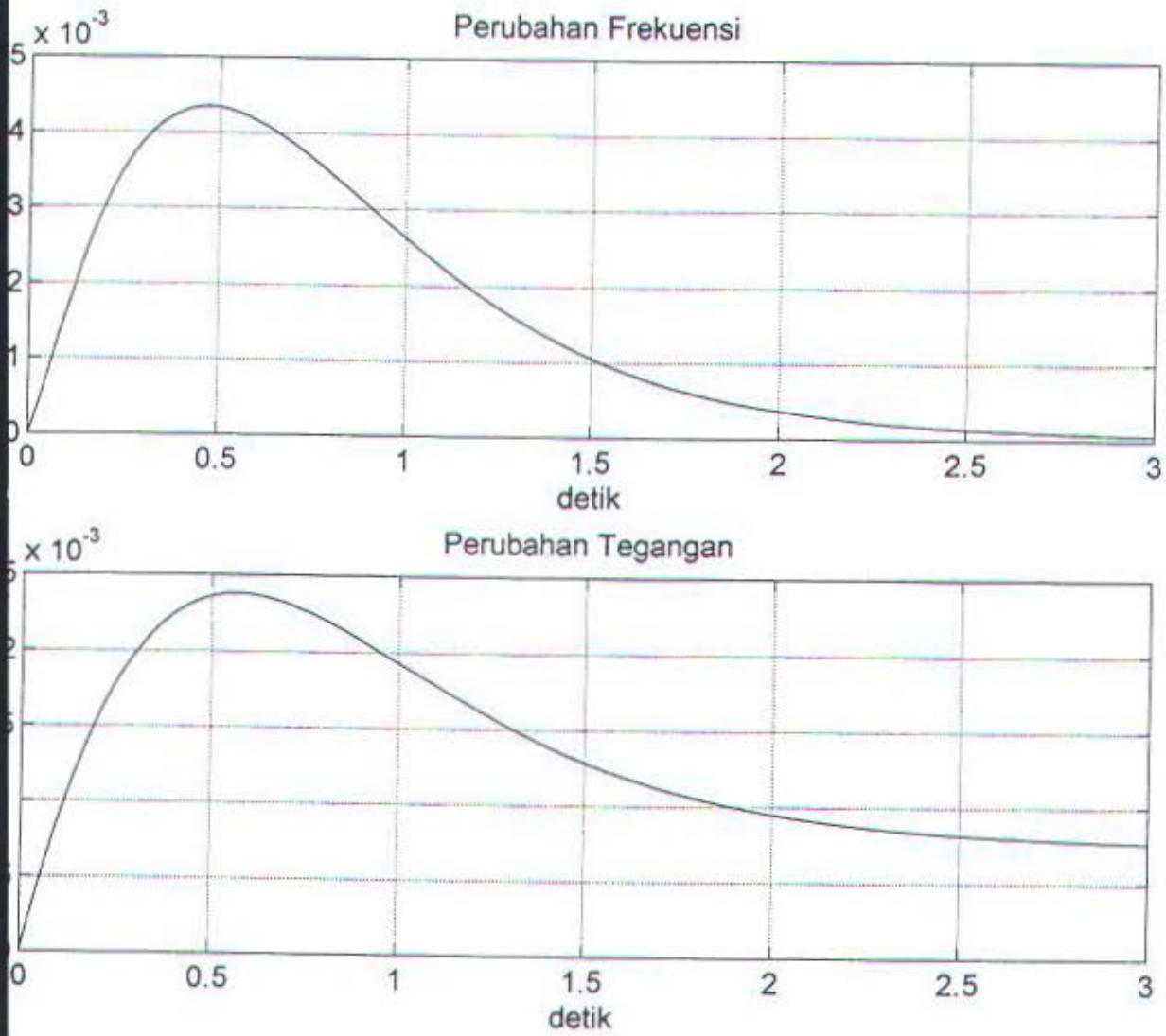
Gambar 4.15. Respon umpan balik pada sisi turbin dan eksitasi untuk Q_d dan R_d



Gambar 4.16. Keluaran frekuensi dan tegangan untuk nilai Q_r dan R_r



Gambar 4.17. Keluaran frekuensi dan tegangan untuk nilai Q_2 dan R_2



Gambar 4.18. Keluaran frekuensi dan tegangan untuk nilai Q_j dan R_j

Dari hasil simulasi di atas terlihat bahwa respon umpan balik maupun keluaran sistem semakin baik untuk perbaikan nilai matriks pembobotnya dan waktu dari respon peredaman menuju ke keadaan mantap dalam satuan detik adalah seperti tabel berikut :

Tabel 4.4. Waktu menuju ke keadaan mantap setelah adanya gangguan dalam satuan detik dengan nilai Q dan R secara Bryson.

Matrik pembobot	Frekuensi	Tegangan
Q_0, R_0	5 detik	5 detik
Q_1, R_1	5 detik	5 detik
Q_2, R_2	3 detik	3 detik
Q_3, R_3	3 detik	3 detik

(Nilai Q dan R terlampir)

Dari Tabel 4.4., matriks pembobot yang diperbaharui akan menghasilkan respon keluaran yang semakin cepat menuju ke kondisi mantap dan perubahan nilai matriks Q dan R selalu pada daerah kestabilan, yaitu dengan memperbesar nilai matriks Q dan memperkecil nilai R untuk setiap iterasi sehingga nilai gain umpan balik semakin besar dan sistem semakin cepat menuju *steady-state*.

Dari simulasi metode ini dapat disimpulkan bahwa dengan metode Bryson akan mempermudah pemilihan nilai matriks pembobot Q dan R dengan respon keluaran yang memuaskan dibandingkan secara *Trial-Error*, dan nilai yang diperoleh selalu memenuhi syarat sebagai matriks pembobot karena merupakan matriks diagonal dan bernilai positif, tetapi meskipun sederhana metode ini mempunyai kelemahan yaitu tidak memberi solusi yang memuaskan apabila respon keluaran tidak sesuai dengan karakteristik sistem yang diinginkan.

4.5.3. Simulasi Pada Metode Eksak

Metode ini didasarkan pada prinsip penempatan akar-akar karakteristik sistem umpan balik yang diinginkan. Nilai awal Q_o dan R_o diberikan, sehingga nilai matriks umpan balik sistem dapat dihitung, dan didapatkan nilai parameter sistem loop tertutup (A_k) yaitu :

$$A_k = A - B K$$

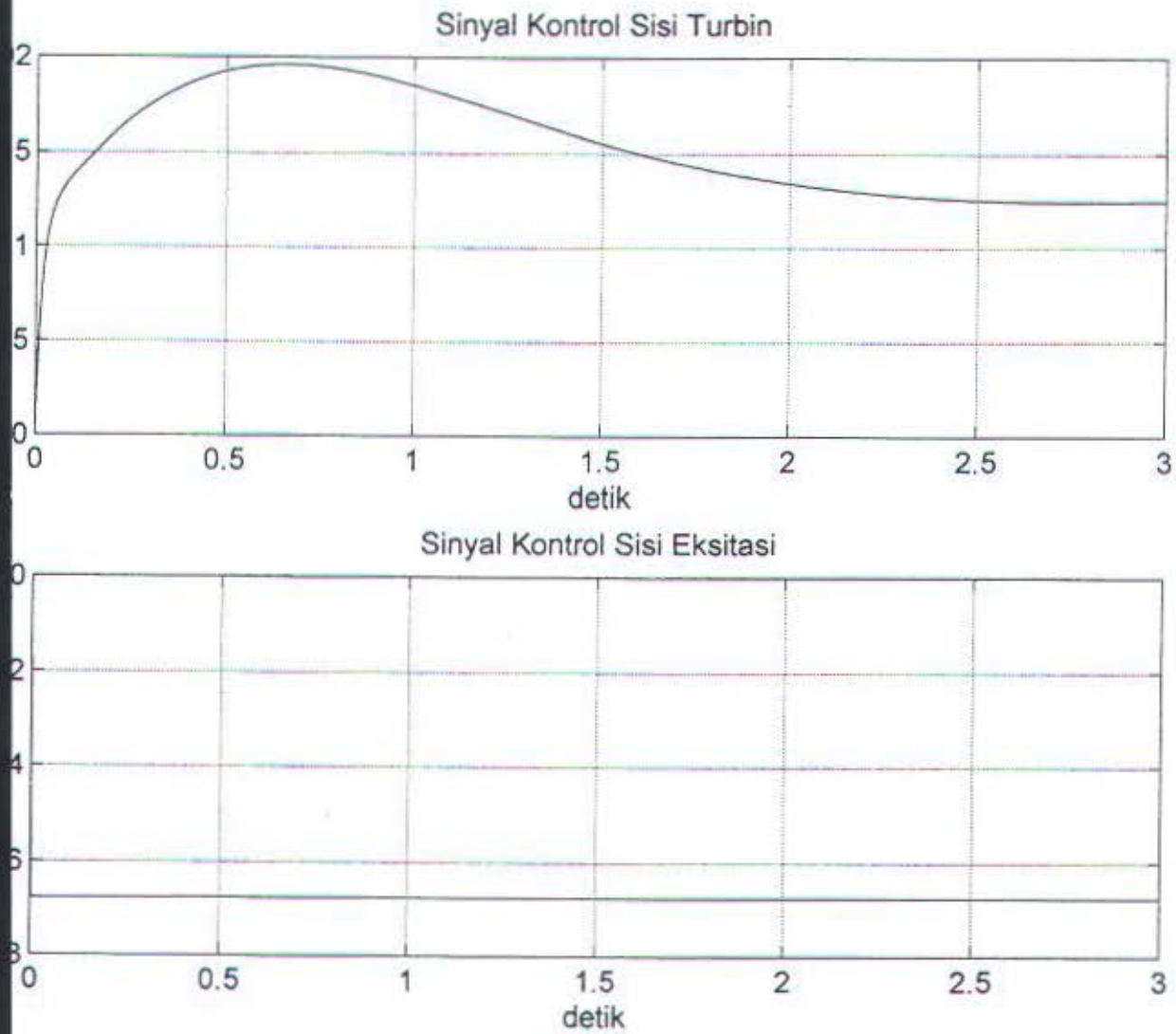
dengan,

A = nilai parameter keadaan sistem

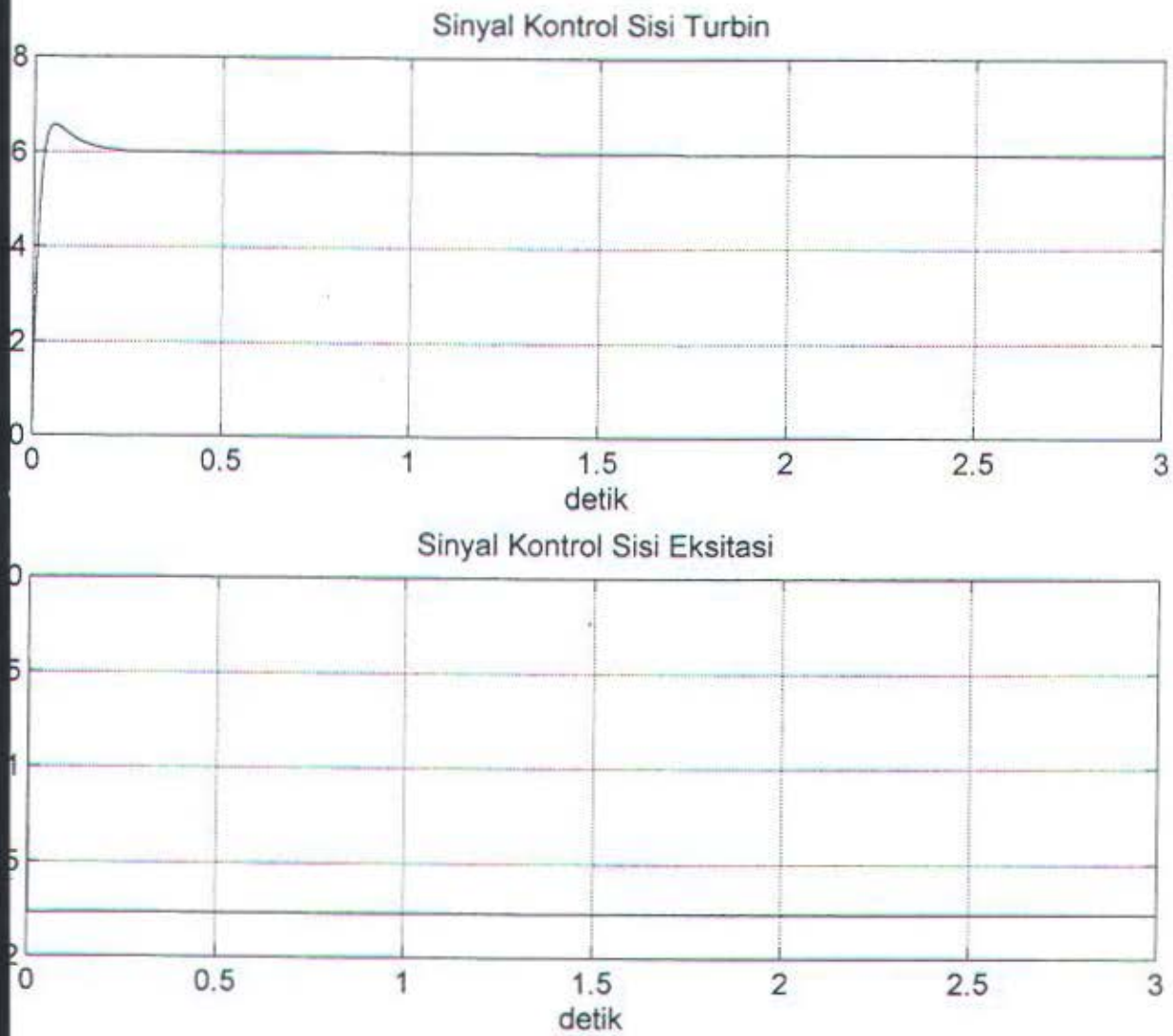
B = nilai parameter masukan sistem

K = gain umpan balik.

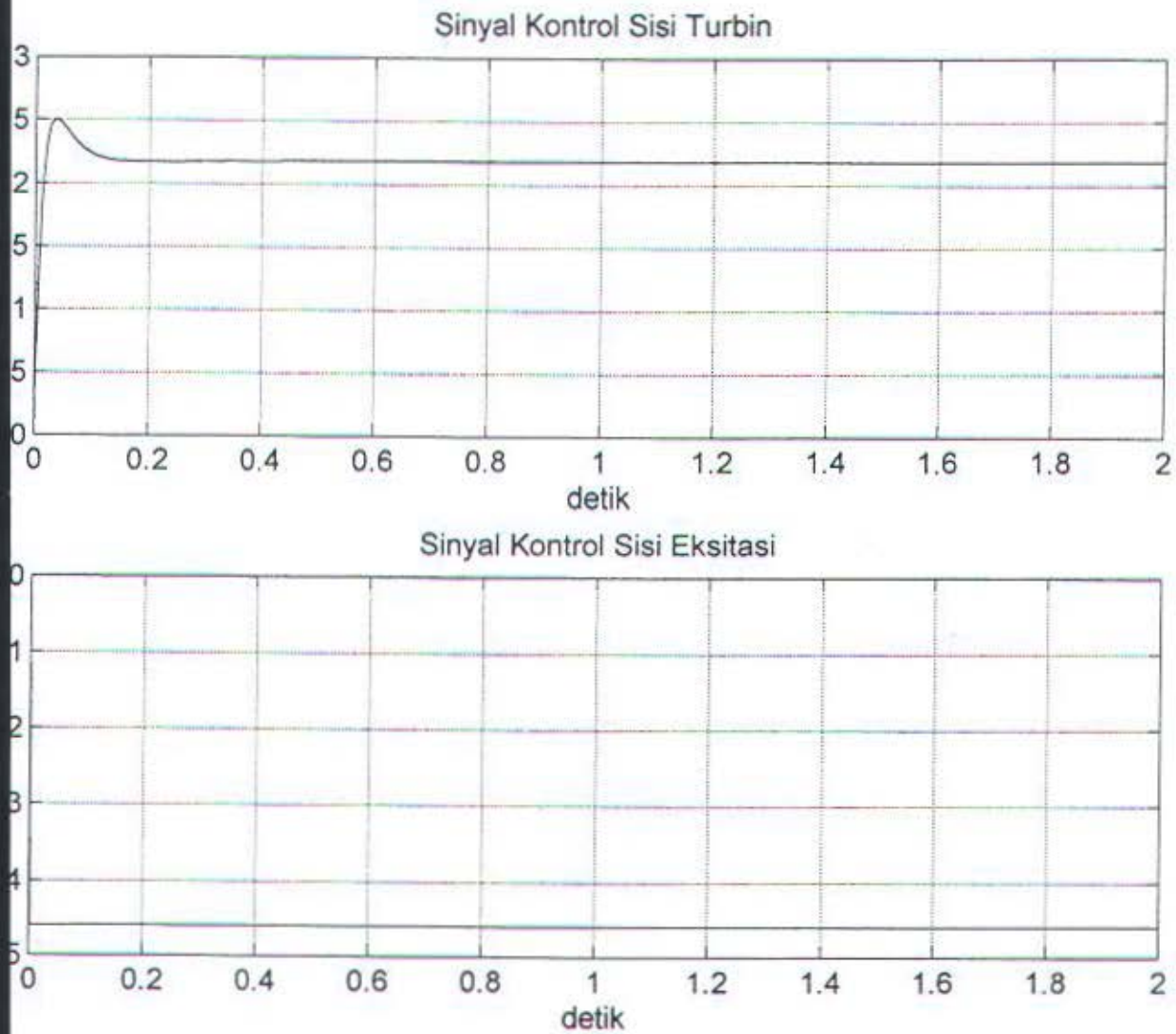
Dari nilai A_k ini dapat diketahui akar-akar loop tertutup sistem, yaitu pada bidang negatif untuk sistem stabil. Untuk mendapatkan keluaran sistem yang lebih baik maka nilai akar-akar sistem digeser ke lokasi akar yang diinginkan sepanjang daerah kestabilan. Dari hubungan ini diperoleh nilai Q_k yang merupakan fungsi kedudukan akar-akar pada lokasi baru terhadap akar-akar sebelumnya, dan setiap pergeseran nilai akar-akar sistem akan mengakibatkan perubahan nilai matriks Q untuk memperbaiki keluaran sistem sesuai dengan yang diinginkan. Adapun hasil simulasi dari pemilihan matriks pembobot secara eksak terhadap respon umpan balik dan keluaran sistem dengan nilai matriks R tetap (diagonal 1) adalah sebagai berikut :



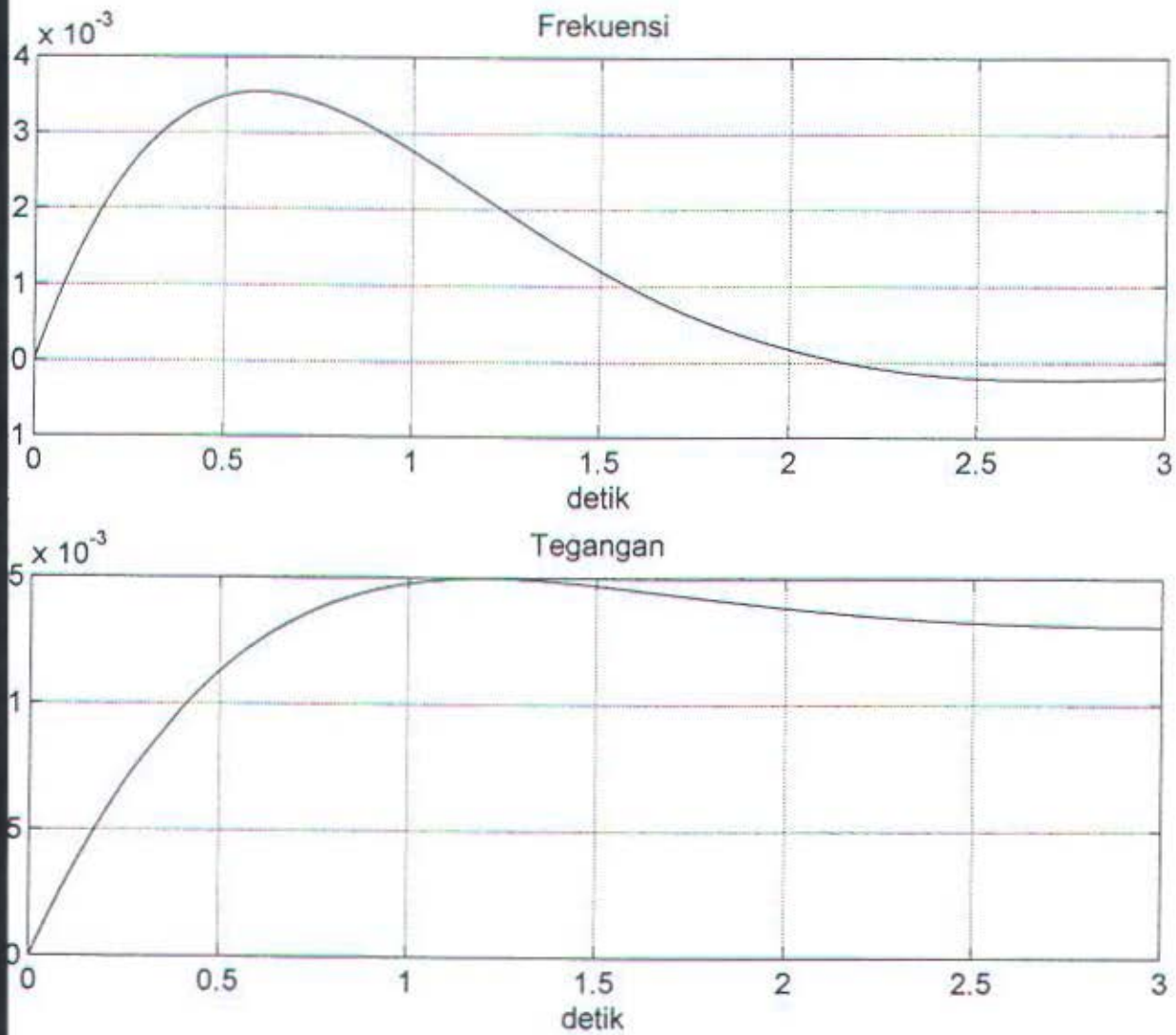
Gambar 4.19. Respon umpan balik pada sisi turbin dan eksitasi untuk Q_1



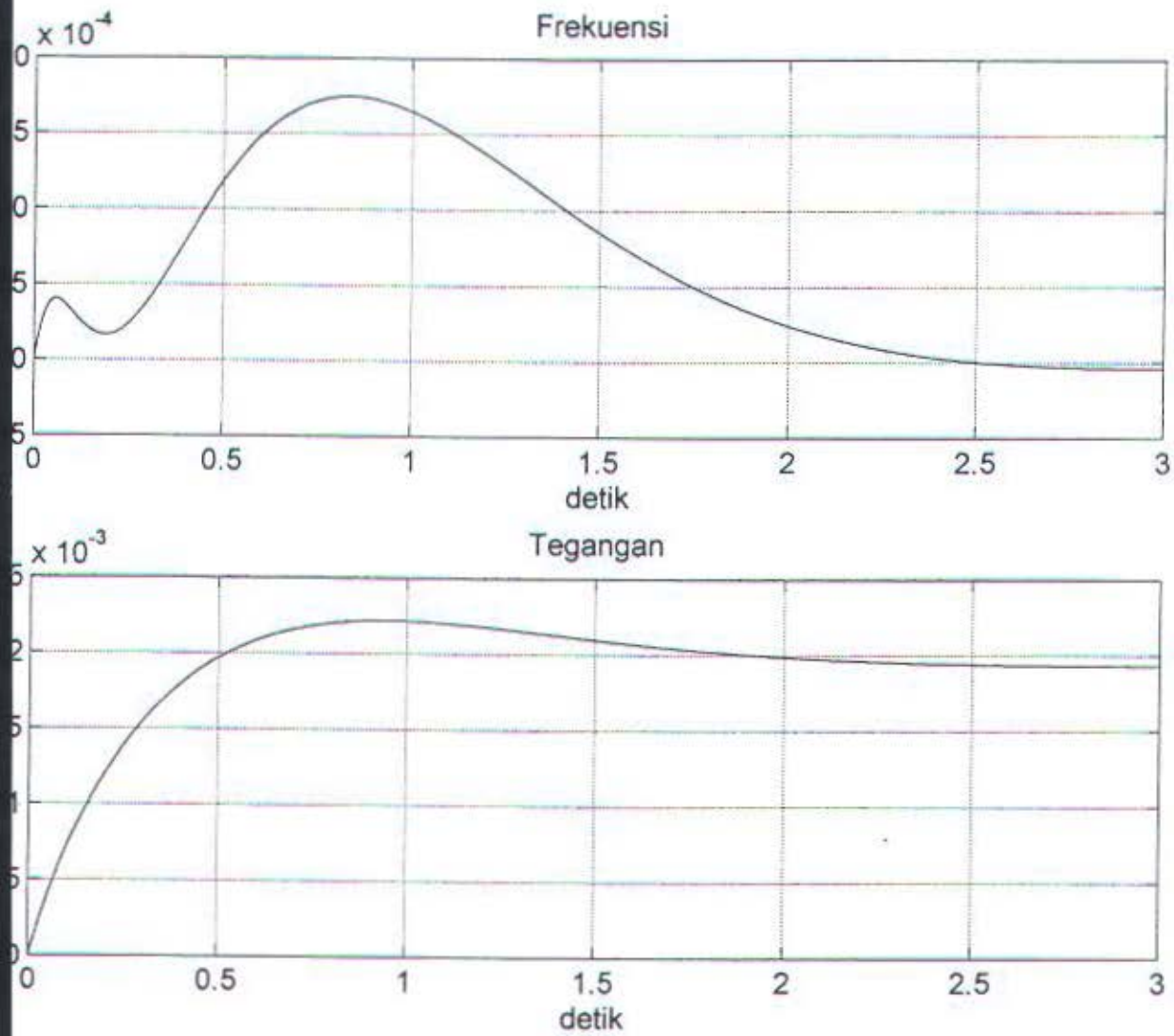
Gambar 4.20. Respon umpan balik pada sisi turbin dan eksitasi untuk Q_2



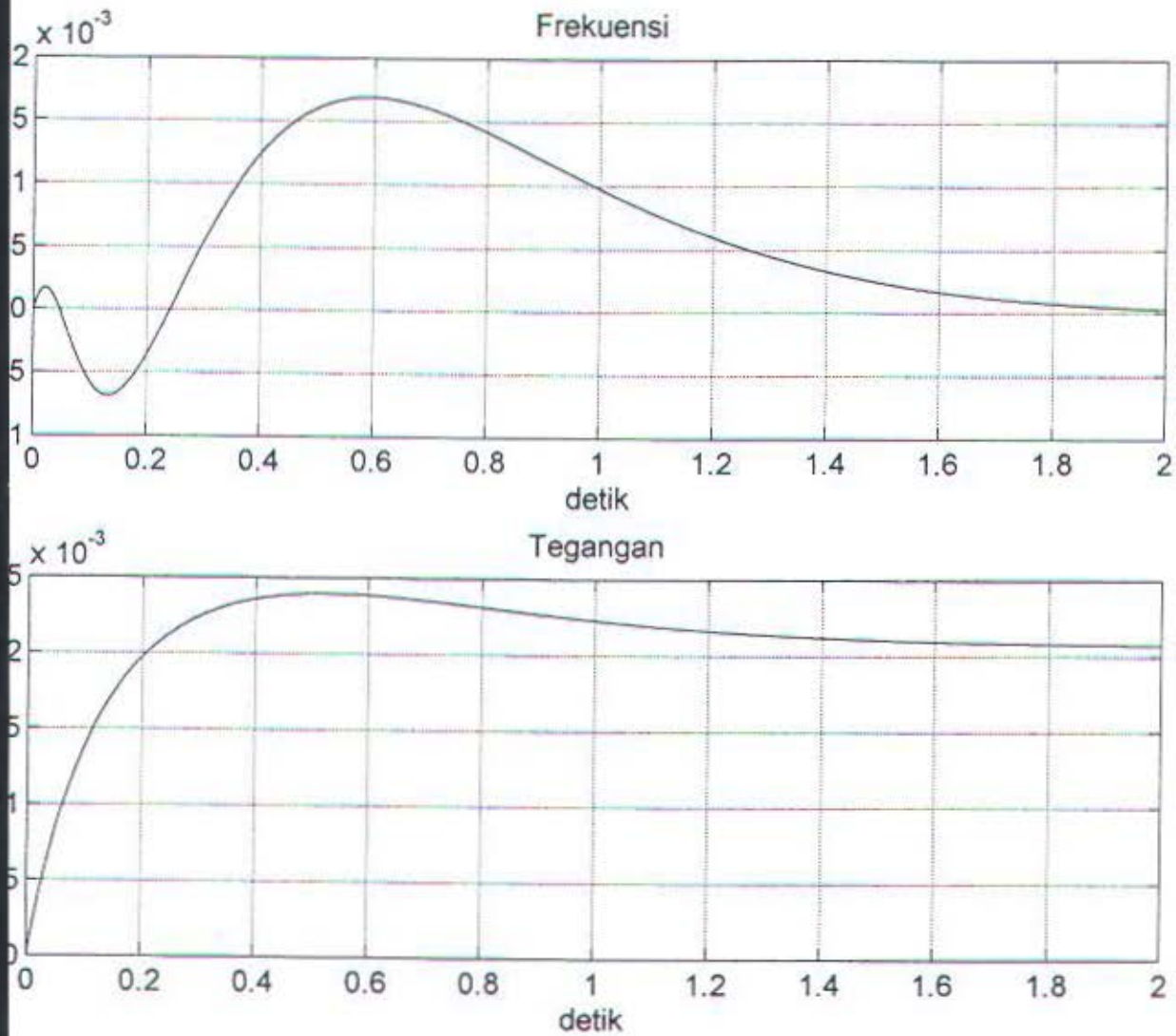
Gambar 4.21. Respon umpan balik pada sisi turbin dan eksitasi untuk Q_3



Gambar 4.22. Keluaran frekuensi dan tegangan untuk nilai Q_1



Gambar 4.23. Keluaran frekuensi dan tegangan untuk nilai Q_2



Gambar 4.24. Keluaran frekuensi dan tegangan untuk nilai Q_3

Dari simulasi terlihat bahwa pemindahan lokasi akar-akar persamaan loop tertutup menuju lokasi yang diinginkan akan mendapatkan nilai-nilai matriks pembobot yang baru, kemudian matriks ini dipergunakan untuk menentukan respon umpan balik dan keluaran sistem. Adapun respon waktu keluaran sistem menuju kondisi mantap berdasarkan penggeseran nilai akar-akar sistem dalam satuan detik dapat dilihat dalam tabel berikut :

Tabel 4.5. Waktu peredaman menuju kondisi mantap dalam satuan detik dengan nilai Q melalui metode Eksak.

Penggeseran nilai akar	Frekuensi	Tegangan
harga awal	12 detik	12 detik
1 ke kiri	3 detik	3 detik
5 ke kiri	2.5 detik	2.5 detik
15 ke kiri	2. detik	1.8 detik

(Nilai Q dan R yang diperoleh terlampir)

Dari Tabel ini terlihat bahwa respon keluaran sistem yang paling cepat diperoleh dengan menggeser nilai akar-akar ke kiri sepanjang sumbu nyata dengan nilai matriks pembobot Q yang semakin besar sehingga nilai gain umpan balik semakin besar dan gangguan sistem cepat teredam, sebaliknya bila akar-akar digeser ke kanan maka sinyal umpan balik semakin kecil sehingga waktu yang diperlukan semakin besar dengan osilasi yang lebih banyak dan menuju kondisi tidak terkontrol dan tidak stabil.

Nilai matriks R melalui metode ini adalah tetap sesuai dengan nilai awal yang diberikan karena menaikkan nilai sisi matriks pembobot Q sama dengan menurunkan nilai sisi matriks R .

Dari simulasi yang telah dilakukan terbukti bahwa nilai matriks pembobot dapat mempengaruhi nilai kinerja sistem dengan umpan balik optimal LQR dan dibuktikan bahwa pemberian nilai matriks pembobot secara asumsi belum memberikan nilai kinerja yang optimal.

Pengulangan nilai matriks pembobot menurut metode bryson akan memberikan nilai kinerja yang minimal tetapi belum tentu sesuai dengan karakteristik sistem umpan balik yang diinginkan sedangkan dengan metode Eksak kita dapat menentukan respon waktu keluaran sistem yang lebih baik dibandingkan dengan metode *Trial-Error* maupun secara Bryson karena sesuai dengan akar-akar sistem yang kita inginkan tetapi respon umpan balik yang diperoleh lebih besar tidak sesuai dengan indek kinerja minimal J .

BAB V

PENUTUP

5.1. KESIMPULAN

1. Metode pemilihan nilai matriks pembobot pada penerapan umpan balik optimal LQR sistem tenaga listrik mesin tunggal PLTU Gresik dapat mempengaruhi respon waktu keluaran sistem menjadi sekitar 2 detik dalam mengeliminasi gangguan untuk mempercepat respon waktu frekuensi dan tegangan ke keadaan mantap.
2. Pemilihan matriks pembobot secara coba-coba akan memerlukan waktu proses pemilihan yang lama dan belum menghasilkan nilai kinerja sistem yang optimal dengan respon waktu sekitar 7 detik.
3. Pemilihan matriks bobot melalui metode Bryson merupakan cara alternatif untuk memperbaiki/memperbaharui nilai matriks pembobot sehingga respon umpan balik dan waktu keluaran sistem menjadi lebih baik yaitu 3 detik tetapi belum tentu sesuai dengan karakteristik yang diinginkan.
4. Melalui metode Eksak dalam pemilihan matriks pembobot, dapat memberikan respon waktu keluaran menjadi 1,8 detik sesuai dengan karakteristik/nilai akar-akar loop tertutup yang diinginkan namun nilai respon umpan balik yang dihasilkan terlalu besar tidak sesuai dengan indek kinerja minimal J.

5.2. SARAN

1. Penentuan harga akar-akar loop tertutup sesuai dengan yang diinginkan perlu studi pengkajian lebih lanjut, dalam penerapannya sesuai dengan karakteristik mesin yang digunakan.
2. Perlu pengembangan studi lebih lanjut dengan pemberian harga-harga sesuai dengan yang ada pada sistem sebenarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Adi Soeprijanto, **Metode Sederhana Penalaan Power System Stabilizer**, Tesis Magister Teknik, ITB., Nopember 1994.
- [2] Brian D. O. Anderson And John B. Moore, **Linear Optimal Control**, Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, 1971.
- [3] Donald E. Kirk, **Optimal Control Teory**, Prentice-Hall, Inc, New Jersey, 1970.
- [4] Francisco P Demello And Chales Concordia., "Concepts Of Synchronous Machine Stability As Affected By Excitation Control," IEEE Trans, April 1969, hal. 189-202.
- [5] Frank L Lewis, **Applied Optimal Control And Estimation**, Prentice-Hall, Inc, New Jersey, 1992.
- [6] IEEE Committee Report, "Recent Trends In Linear Optimal Quadratic Multivariable Control System Design," Trans, Vol.134, no.1, January 1987.
- [7] Imam Robandi, **Studi Perbaikan Kinerja Dinamik Sistem Tenaga Listrik Multi Mesin Dengan Umpan Balik Optimal**, Tesis Magister Teknik, ITB., Nopember 1994.
- [8] Isnuwardianto, Dr. Ir., **Dinamika Dan Kendali Sistem Tenaga Listrik**, ITB.
- [9] Ogata, K., Alih bahasa : Ir. Edi Leksono, **Teknik Kontrol Automatik (Sistem Pengaturan)**, jilid 1, Erlangga, Jakarta, 1991.
- [10] Ogata, K., Alih bahasa : Ir. Edi Leksono, **Teknik Kontrol Automatik (Sistem Pengaturan)**, jilid 2, Erlangga, Jakarta, 1991.
- [11] P.M. Anderson, And A.A. Fouad, **Power System Control And Stability**, The Iowa University Press, 1982.
- [12] Robert A Gabel , And Richard A Robert, **Signal And Linear System** (third edition), 1984.

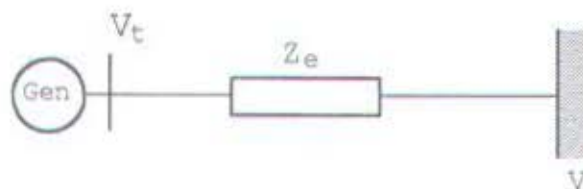
- [13] Stevenson, W.D., Alih bahasa : Ir Kemal Idris, Analisis Sistem Tenaga, Erlangga, Jakarta, 1984.
- [14] Sulasno, Ir., Pusat Pembangkit Tenaga Listrik, Satya Wacana, Semarang, 1990.
- [15] Suprajitno Munadi, Dr., Perhitungan Matriks Dengan Fortran, Andi Offset, Jogjakarta 1990.
- [16] Widodo, R.J., Teori Kontrol Optimal Dalam Rancangan Dan Analisa Dinamika Sistem, Disertasi Doktor, ITB., 1984.
- [17] - PLN, Project Plant P-F 1009, Study Of Excitaci For Generator Unit I And II, Gresik.

Lampiran 1

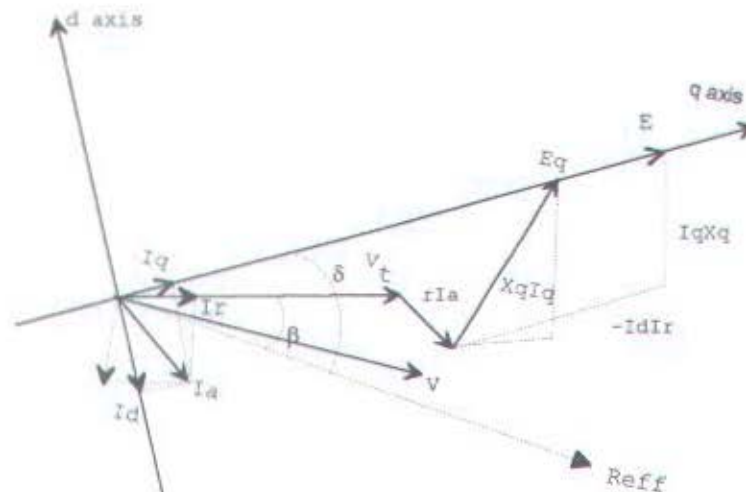
PROSES PERHITUNGAN K1 - K6 [11]

Penyelesaian persamaan-persamaan $K_1 - K_6$ di sini berdasarkan konsep yang diajukan dan dikemukakan oleh Francisco P Demello dan Chales Concordia yaitu mesin tunggal yang terhubung dengan bus infinite dan metode-metode yang dikembangkan oleh P.M. Anderson dan A.A. Fouad .

Persamaan untuk mesin tunggal yang dihubungkan dengan bus infinit dengan tegangan V melalui impedansi eksternal $R_e + j X_e$ digambarkan sebagai berikut



Gambar L.1. Generator terhubung bus infinit dengan impedansi saluran



Gambar L.2. Phasor diagram dari tegangan terminal dan infinit bus

Dengan mengetahui harga dari parameter sistem, maka dapat dihitung :

$$P = V I \cos \phi$$

$$I_a = P / (V \cos \phi)$$

sehingga diperoleh

$$I_r = I_a \cos \phi$$

$$I_x = -I_a \sin \phi$$

besar sudut antara sumbu q dengan tegangan terminal adalah :

$$(\delta - \beta) = \tan^{-1} \left[\frac{X_q I_r + r I_x}{V_a + r I_r - X_q I_x} \right]$$

$$I_q = I_a \cos (\delta - \beta + \phi)$$

$$I_d = -I_a \sin (\delta - \beta + \phi)$$

$$V_q = V_a \cos (\delta - \beta)$$

$$V_d = -V_a \sin (\delta - \beta)$$

Dengan melihat gambardi atas maka :

$$E = V_q + r I_q - X_d I_d$$

dan

$$E_{qao} = E + I_d (X_d - X_q)$$

Untuk menghitung sudut antara sumbu quadratur dengan sumbu tegangan infinit :

$$(\delta - \alpha) = (\delta - \beta) + (\beta - \alpha)$$

$$V(\alpha - \beta) = V_a(\beta) - Z_e(\theta) I_a(\beta - \phi)$$

Dari persamaan-persamaan di atas maka diperoleh harga gain K_1 - K_6 sebagai

berikut :

$$K_1 = \frac{1}{R_e^2 + (X_q + X_e)(X'_d + X_e)}$$

$$K_{11} = E_{q0} \{ (R_e \sin(\delta_0) + (X_d' + X_e) \cos(\delta_0)) \}$$

$$K_{12} = I_{q0} (X_q - X_d') [(X_q + X_e) \sin(\delta) - R_e \cos(\delta)]$$

$$K_1 = K I V_a (K_{11} + K_{12})$$

$$K_2 = K I (R_e \{ E_{q0} + I_{q0} * (R_e^2 + (X_q + X_e)^2) \})$$

$$K_3 = 1 / [1 + K I \{ (X_d - X_d') (X_q + X_e) \}]$$

$$K_4 = V_a K I (X_d - X_d') [(X_q + X_e) \sin(\delta) - R_e \cos(\delta)]$$

$$K_{51} = (K I V X_d' V_{q0} / V_{t0}) [R_e \cos(\delta) - (X_q + X_e) \sin(\delta)]$$

$$K_{52} = (K I V X_q V_{d0} / V_t) [(X_d' + X_e) \cos(\delta) + R_e \sin(\delta)]$$

$$K_5 = K_{51} - K_{52}$$

$$K_6 = (V_{q0} / V_t) [1 - K I X_d' (X_q + X_e)] - (V_{d0} / V_{t0}) K I X_q R_e$$

dengan,

I_d, I_q Komponen arus sumbu direct dan sumbu quadrature

V_d, V_q Komponen tegangan sumbu direct dan sumbu quadrature

V_t Tegangan terminal

E_q' Tegangan peralihan sumbu quadrature

X_e Reaktansi ekivalen

R_e Resistansi ekivalen

Lampiran 2 :

NILAI MATRIKS PEMBOBOT Q DAN R HASIL SIMULASI

A. Metode Trial-Error

Nilai matriks pembobot diberikan dalam setiap percobaan :

Q1

10	0	0	0	0	0
0	10	0	0	0	0
0	0	10	0	0	0
0	0	0	10	0	0
0	0	0	0	10	0
0	0	0	0	0	10

R1

1	0
0	1

Q2

20	-1	0	0	0	10
-1	100	0	0	2	0
0	0	20	0	6	6
0	0	0	10	0	0.7
0	2	6	0	100	0

R2

1	0
0	1

Q3

100	0	0	0	0	0
0	100	0	0	0	0
0	0	100	0	0	0
0	0	0	100	0	0
0	0	0	0	100	0
0	0	0	0	0	100]

R3

.01	0
0	.01

BIO DATA



Penulis dilahirkan dengan nama I Gede Putu Ambara Guna, merupakan anak ke-5 dari pasangan Bapak I Gede Ketut Sukadana dan Ibu Ni Ketut Warni di sebuah desa nan permai Pandak Gede, Kecamatan Kediri, Kabupaten Tabanan Bali pada Sabtu, weton Pahing, Menail tanggal 29 Januari 1972.

Adapun pendidikan yang telah ditempuh adalah :

1. SD No. 3 Desa Pandak Gede, Tabanan, Bali, Tahun 1978-1984
2. SMP I Kediri, Tabanan, Bali, Tahun 1984-1987
3. SMA I Tabanan, Bali, Tahun 1987-1990
4. Mahasiswa Teknik Elektro, ITS sejak 1990 dengan Nomor Pokok 2902201467.

Selama menjadi mahasiswa aktif menjadi asisten praktikum Teknik Tenaga Listrik dan Teknik Tegangan Tinggi di Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS



Penulis